



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY  
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

**ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY**

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

**ŘÍZENÍ VELIKOSTI NAPĚTÍ V NN SÍTI POMOCÍ  
DISTRIBUČNÍCH A LINKOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ NA  
ZÁKLADĚ DISTRIBUOVANÉHO MĚŘENÍ**

VOLTAGE PROFILE REGULATION IN LV DISTRIBUTION SYSTEMS BY MEANS OF OLTC EQUIPPED  
DISTRIBUTION TRANSFORMER AND SERIES TRANSFORMERS BASED ON DISTRIBUTED MONITORING

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Tomáš Hála**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Ing. Jiří Drápela, Ph.D.**

**BRNO 2018**

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

**Student:** Bc. Tomáš Hála

**ID:** 164725

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2017/18

## NÁZEV TÉMATU:

**Řízení velikosti napětí v NN síti pomocí distribučních a linkových transformátorů  
na základě distribuovaného měření**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Problematika koordinace profilů napětí v typických DS se standardním regulačním schématem
2. Sumarizace přístupů a prostředků pro stabilizaci napětí v DS se zaměřením na přímou regulaci napětí
3. Návrh řídicích/regulačních schémat na bázi znalostních/ predikčních/ adaptačních/ detekčních principů
4. Sestavení vhodného modelu ve vybraném prostředí pro verifikaci vlastností vhodných regulačních schémat
5. Realizace souboru simulací s klasifikací jednotlivých navržených řešení

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

Literatura je stanovena dle pokynů vedoucího práce.

**Termín zadání:** 5.2.2018

**Termín odevzdání:** 15.8.2018

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Jiří Drápela, Ph.D.

**Konzultant:**

**doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**  
*předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Bibliografická citace práce:

HÁLA, T. *Řízení velikosti napětí v NN síti pomocí distribučních a linkových transformátorů na základě distribuovaného měření*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 83 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Drápela, Ph.D..

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Řízení velikosti napětí v NN síti pomocí distribučních a linkových transformátorů na základě distribuovaného měření jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.“

V Brně dne: 15.08.2018

.....

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce se zabývá řízením velikosti napětí v sítích NN s ohledem na nárůst distribuované výroby zejména pak obnovitelných zdrojů energie. Obsahuje rešerši o stávajícím stavu sítí nízkého napětí. Následuje návrh řešení nově vzniklého stavu spočívající v nasazení OLTC distribučního transformátoru a v případě složitější topologie nasazení sériového transformátoru napětí, které budou součástí konceptu Smart Grid. V této práci je rozebrána také problematika měření a přenosu dat.

Jako druhá část je popis vybraných řídicích strategií a jejich simulace. Pro potřebu simulací je zde popsán návrh modelů jednotlivých prvků soustavy v prostředí PSCAD. Z těchto prvků byla sestavena testovací síť a na ní byly odzkoušeny jednotlivé scénáře simulací.

**KLÍČOVÁ SLOVA:** Sítě nízkého napětí; regulace napětí; Smart Grid; Obnovitelné zdroje energie; distribuční transformátor; OLTC, sériový transformátor napětí; PSCAD,

## **ABSTRACT**

This diploma thesis discusses two major topics. The first one is the control size of the voltage in LV networks in regard to the increase in distributed generation concerned to renewable energy sources. The study contains a review focused on the current state of low voltage grid followed by a proposal for the solution of the oncoming state. The solution is identified as a deploying OLTC distribution transformer. In the case of more complex topology is deployed a series voltage transformer. Both methods are part of the Smart Grid. The thesis also analyzes the issue of the data measurement and data transmission. The second part of the thesis consists of the description of selected control strategies and their simulations. The design of individual system elements in the PSCAD is described. From these elements, a test network was constructed and tested the individual simulation scenarios.

**KEY WORDS:** Low Voltage Grid; Voltage Control; Smart Grid; Renewable Energy Sources; Distribution Transformer; OLTC; Series Transformer;

Tímto děkuji panu doc. Ing. Jiřímu Drápelovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a připomínky při zpracování mé diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat rodičům za podporu a umožnění studia. V neposlední řadě děkuji všem blízkým, kteří mě při psaní této diplomové práce jakýmkoliv způsobem podpořili.

## OBSAH

<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>8</b>
<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>10</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>11</b>
<b>1 ÚVOD .....</b>	<b>12</b>
<b>2 CHARAKTERISTIKA STÁVAJÍCÍHO STAVU .....</b>	<b>13</b>
<b>2.1 KONCEPCE REGULACE NAPĚTÍ V DS .....</b>	<b>13</b>
2.1.1 REGULACE U/Q V DISTRIBUČNÍ SOUSTAVĚ .....	14
<b>2.2 SOUČASNÝ STAV REGULACE NAPĚTÍ NN .....</b>	<b>15</b>
<b>2.3 NEPŘÍZNIVÉ VLIVY DISPERZNÍCH ZDROJŮ V DS .....</b>	<b>17</b>
<b>3 CÍLE PRÁCE.....</b>	<b>20</b>
<b>4 KONCEPT SMART GRID SE ZOHLEDNĚNÍM K DS [1] .....</b>	<b>21</b>
<b>4.1 POŽADAVKY NA NOVÉ SÍTĚ NN .....</b>	<b>21</b>
<b>4.2 OPATŘENÍ PRO ZAČLENĚNÍ DISTRIBUOVANÝCH ZDROJŮ .....</b>	<b>21</b>
<b>5 ZPŮSOBY REGULACE NAPĚTÍ V NN.....</b>	<b>23</b>
<b>5.1 NAPĚŤOVÁ REGULACE .....</b>	<b>23</b>
5.1.1 TRANSFORMÁTORY OLTC.....	23
5.1.2 LINKOVÉ KONDICIONÉRY [24] .....	26
5.1.3 LINKOVÝ REGULÁTOR ABB [23] .....	28
5.1.4 SÉRIOVÉ TRANSFORMÁTORY – CVT.....	29
<b>6 MĚŘENÍ A PŘENOS DAT .....</b>	<b>31</b>
<b>6.1 MĚŘENÍ.....</b>	<b>31</b>
<b>6.2 KOMUNIKACE PRO SPRÁVNOU FUNKCI REGULAČNÍHO SCHÉMATU .....</b>	<b>31</b>
<b>6.3 ZHODNOCENÍ VOLBY KOMUNIKACE .....</b>	<b>34</b>
<b>7 ZPŮSOB ŘÍZENÍ/REGULACE .....</b>	<b>35</b>
7.1.1 MANUÁLNÍ PEVNÉ NASTAVENÍ ODBOČKY .....	35
7.1.2 ROZHODOVÁNÍ ALGORITMU NA ZÁKLADĚ MĚŘENÍ NA SEKUNDÁRNÍ STRANĚ DTS .....	35
7.1.3 ROZHODOVÁNÍ NA ZÁKLADĚ MĚŘENÍ V PŘEDÁVACÍCH MÍSTECH .....	36
<b>7.2 MÍSTO ŘÍZENÍ .....</b>	<b>36</b>
<b>8 MATEMATICKÝ MODEL .....</b>	<b>37</b>
<b>8.1 ČASOVÁ KOMPRESSE .....</b>	<b>38</b>
<b>8.2 MODELOVÁNÍ KOMPONENT.....</b>	<b>39</b>
8.2.1 ZDROJ 22kV .....	39
8.2.2 VEDENÍ.....	42
8.2.3 TRANSFORMÁTOR .....	42
8.2.4 ODBĚRNÉ MÍSTO.....	43
8.2.5 MĚŘENÍ ODBĚRNÉHO MÍSTA .....	48
8.2.6 FVE .....	54
<b>8.3 REGULÁTOR PŘEPÍNAČE ODBOČEK .....</b>	<b>57</b>

---

8.3.1 P/U REGULACE OLTC.....	57
8.3.2 REGULACE NA ZÁKLADĚ MĚŘENÍ NA OPM.....	62
<b>9 SIMULACE TESTOVACÍ SÍTĚ .....</b>	<b>64</b>
<b>9.1 TOPOLOGIE SÍTĚ .....</b>	<b>64</b>
<b>9.2 SCÉNÁŘE SIMULACÍ.....</b>	<b>66</b>
9.2.1 PEVNÉ NASTAVENÍ ODBOČKY .....	66
9.2.2 PŘEPÍNÁNÍ ODBOČEK NA ZÁKLADĚ MĚŘENÍ NA SEKUNDÁRNÍ STRANĚ DTS .....	68
9.2.3 PŘEPÍNÁNÍ ODBOČEK NA ZÁKLADĚ MĚŘENÍ NA OPM .....	71
<b>10 ZÁVĚR .....</b>	<b>74</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA .....</b>	<b>76</b>
<b>PŘÍLOHA A – SKRIPT PRO TAPCH_PU .....</b>	<b>78</b>
<b>PŘÍLOHA B - SKRIPT PRO TAPCH_ONLINE.....</b>	<b>81</b>



## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 - Schéma distribuční sítě VN/NN [17].....	14
Obrázek 2 - Vliv nesymetrie odběru na napětí [17] .....	15
Obrázek 3 - Průběhy změny soudobého profilu napětí pomocí přepínání odboček transformátoru .....	17
Obrázek 4 - Diagram výroby elektrické energie FVE v průběhu roku .....	18
Obrázek 5 - Diagram velikosti úbytku napětí po připojení zdroje (zde OZE) do sítě s více radiálními vývody a) před přepnutím odbočky a b) po přepnutí odbočky (upraveno autorem) [31] .....	19
Obrázek 6 - Principiální schéma transformátoru OLTC– upraveno autorem [5] .....	24
Obrázek 7 - Zjednodušený diagram funkce regulace Smart transformátoru – upraveno autorem [5] .....	25
Obrázek 8 - Schéma zapojení linkového kondicionéru [22].....	27
Obrázek 9- Schéma napěťového regulátoru [23] (upraveno autorem) .....	28
Obrázek 10 - Schéma CVT (upraveno autorem) [8].....	29
Obrázek 11 - Zatěžovací charakteristika CVT (upraveno autorem) [8] .....	30
Obrázek 12 - Závislost výstupního napětí na vstupním napětí (upraveno autorem) [8] .....	30
Obrázek 13 – Blokové schéma přenosu mezi elektroměry a DTS.....	32
Obrázek 14- Rychlosti RTT pro bezdrátové mobilní sítě [29].....	33
Obrázek 15- Principiální přenos dat PLC [15].....	33
Obrázek 16 - Principiální zjednodušené schéma modelu.....	38
Obrázek 17 - Blok nastavení převodu času .....	39
Obrázek 18 - Schematická značka Zdroje VN .....	39
Obrázek 19 - Zdrojová část VN .....	40
Obrázek 20 - Průběh profilu Sin.....	40
Obrázek 21 - Schéma zapojení obvodu řízení profilu napětí VN.....	41
Obrázek 22- Celkový profil napětí během dne.....	42
Obrázek 23 - Schéma vnitřního zapojení transformátoru .....	43
Obrázek 24 - Celkový průběh $P$ a $Q$ během dne při nastavení výkonu $S_{max} = 1000 \text{ VA}$ .....	44
Obrázek 25 - Schéma řazení parametrizovatelných prvků zátěže .....	45
Obrázek 26 – Schematická značka zátěže ON a OFF .....	47
Obrázek 27 - Schematická značka (vpravo) a schéma vstupního obvodu měření (vlevo) .....	49
Obrázek 28 – Hlavní obvod měření .....	49
Obrázek 29 - Schematická značka a parametrizační okno modulu RMS_AG.....	50
Obrázek 30 – Samplování sinusového signálu .....	50

<i>Obrázek 31 - Příklad vstupních hodnot pro výpočet agregované hodnoty.....</i>	<i>51</i>
<i>Obrázek 32- Principiální algoritmus pro získání agregované hodnoty .....</i>	<i>52</i>
<i>Obrázek 33- Schéma nastavení chyby měření .....</i>	<i>53</i>
<i>Obrázek 34 - Obvod pro výpočet a nastavení zpoždění.....</i>	<i>54</i>
<i>Obrázek 35 - Průběh výroby FVE (upraveno autorem) [9] .....</i>	<i>54</i>
<i>Obrázek 36 - Ideální průběh FVE.....</i>	<i>55</i>
<i>Obrázek 37 - Parametrizační okno FVE If .....</i>	<i>56</i>
<i>Obrázek 38 - Výsledný průběh parametrizovatelné FVE .....</i>	<i>57</i>
<i>Obrázek 39 - Schematická značka Tapch_PU.....</i>	<i>57</i>
<i>Obrázek 40 - Závislost činného výkonu na referenčním napětí [32].....</i>	<i>58</i>
<i>Obrázek 41 - Schéma pro výpočet úbytku napětí.....</i>	<i>59</i>
<i>Obrázek 42- Zjednodušený algoritmus přepnutí odbočky pomocí tap_PU.....</i>	<i>60</i>
<i>Obrázek 43-Parametrizační okno modulu tapch_PU.....</i>	<i>61</i>
<i>Obrázek 44- Parametrizační okno Tapch_online .....</i>	<i>62</i>
<i>Obrázek 45 - Zjednodušený vývojový diagram Tapch_online.....</i>	<i>63</i>
<i>Obrázek 46 - Schéma testovací sítě .....</i>	<i>64</i>
<i>Obrázek 47- Průběh napětí při jmenovitém převodu transformátoru .....</i>	<i>65</i>
<i>Obrázek 48- Chybné nastavení parametrů DTS.....</i>	<i>65</i>
<i>Obrázek 49 - Profily napětí při správném nastavení transformátoru .....</i>	<i>66</i>
<i>Obrázek 50 - Průběh úbytku napětí na fiktivní zátěži.....</i>	<i>68</i>
<i>Obrázek 51-Nastavení modulu tapch_PU pro scénář 3 .....</i>	<i>68</i>
<i>Obrázek 52 - Bilance toku výkonů na transformátoru.....</i>	<i>69</i>
<i>Obrázek 53 - Průběh přepínání odboček při scénáři 3 .....</i>	<i>70</i>
<i>Obrázek 54- Průběh přepínání odboček při scénáři 4 .....</i>	<i>70</i>
<i>Obrázek 55- Tabulka nastavení Tapch_online .....</i>	<i>71</i>
<i>Obrázek 56 - Grafické porovnání percentipových hodnot napětí OPM před a po regulaci .....</i>	<i>72</i>
<i>Obrázek 57- Historie změny odbočky pro online regulaci na základě měření 10 min intervalů ....</i>	<i>72</i>

## SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1 - Parametry přepínačů odboček [20][21] .....</i>	<i>26</i>
<i>Tabulka 2 - Specifikace linkového kondicionéru 36 kVA od firmy Elcom [23].....</i>	<i>27</i>
<i>Tabulka 3 - Specifikace linkového regulátoru ABB [23].....</i>	<i>28</i>
<i>Tabulka 4 - Rychlosti přenosu dat mobilních sítí [13] .....</i>	<i>32</i>
<i>Tabulka 5 - Přenosové rychlosti PLC komunikace [16].....</i>	<i>34</i>
<i>Tabulka 6 - Pásmo rušení prvků v sítích NN [15] .....</i>	<i>34</i>
<i>Tabulka 7- Parametry použitých vedení a kabelu .....</i>	<i>42</i>
<i>Tabulka 8 - Nastavené parametry modelu transformátoru .....</i>	<i>43</i>
<i>Tabulka 9- koeficienty pro nastavení výkonu .....</i>	<i>44</i>
<i>Tabulka 10 - Parametrizační okno zátěže.....</i>	<i>46</i>
<i>Tabulka 11- Parametrizační okno spínaných zátěží.....</i>	<i>48</i>
<i>Tabulka 12 - Proměnné četnosti zpoždění .....</i>	<i>53</i>
<i>Tabulka 13 - Parametry nastavení hustoty oblačnosti .....</i>	<i>56</i>
<i>Tabulka 14 - Parametry nastavení doby oblačnosti .....</i>	<i>56</i>
<i>Tabulka 15 - Popis parametrů z grafu na obrázku 40.....</i>	<i>58</i>
<i>Tabulka 16 - Parametrizační tabulka nastavení Tapch_online.....</i>	<i>62</i>
<i>Tabulka 17- Souhrnné výsledky pro pevné nastavení převodu 1 .....</i>	<i>67</i>
<i>Tabulka 18- Souhrnné výsledky pro pevné nastavení převodu 1,025 .....</i>	<i>67</i>
<i>Tabulka 19 - Souhrnné výsledky pro scénář 3 .....</i>	<i>69</i>
<i>Tabulka 20 - Souhrnné hodnoty stavu po simulaci scénáře 4 .....</i>	<i>70</i>
<i>Tabulka 21-- Průběh přepínání odboček při scénáři 5.....</i>	<i>71</i>
<i>Tabulka 22 - Souhrnné hodnoty po analýze scénáře 6 .....</i>	<i>73</i>

**SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK**

EU	Evropská Unie
ES	Elektrizační Soustava
OZE	Obnovitelný Zdroj Energie
SG	Smart Grid – Chytrá síť
NN	Nízké Napětí
OLTC	On Load Tap Changer – přepínač odboček při zatížení
P	Činný výkon
Q	Jalový výkon
U	Napětí
DS	Distribuční soustava
PS	Přenosová soustava
FVE	FotoVoltaická Elektrárna
VTE	VěTrná elektrárna
DTS	Distribuční TrafoStanice
NAP	Národní Akční Plán
PLC	Power Line Control – Komunikace po silovém vedení
SVC	Static Var Compensator – Statický kompenzátor jalového výkonu
D-STATCOM	Distributed STATic synchronous COMpensation - Distribuovaná Statická synchronní kompenzace
CVT	Constant Voltage Transformer – Transformátor konstantního napětí
ARN	Automatická Regulace Napětí
PWM	Pulsně šířková modulace
THD	Total harmonic distortion - Zkreslení harmonického průběhu
RTT	Round Trip Time – Obousměrné zpoždění

# 1 ÚVOD

Tak jako ve všech odvětvích, společenských nebo technických, procházíme nezastavitelným vývojem i v oblasti distribuce elektrické energie. Faktem je, že se již více než půl století život naprosté většiny populace neobejde bez elektrické energie. Z důvodů stále měnících se požadavků společnosti je nutná neustálá modernizace elektrizační soustavy.

V dobách minulých byla navržena elektrizační síť, která principiálně svou topologií vydržela dodnes. Tato síť byla navržena pro provoz s malým počtem velkých centralizovaných zdrojů, ve které byl tok elektrické energie jednosměrný - ve směru od výrobce ke spotřebiteli.

V dnešní době je trendem rozvoj decentralizované výroby, zejména obnovitelných zdrojů energie. Tato skutečnost přináší zásadní změnu v požadavcích na ES. Do skladby disperzních zdrojů připojovaných do distribuční soustavy patří majoritně OZE (zejména FVE a VTE), které mají výrobu velkou mírou závislou na přírodě, tudíž se nedají řídit poptávkou. S integrací distribuované výroby musí přijít reakce v podobě modernizace elektrizační sítě. V současné době se připravuje návrh řešení v podobě konceptu inteligentních sítí Smart Grid (SG) [1].

Musíme počítat se změnou toku výkonů v síti a komplikacemi, které tato skutečnost doprovází. Tato diplomová práce se zabývá problematikou velikosti napětí, která je jedním ze základních parametrů kvality elektřiny, konkrétně přímou napěťovou regulací velikosti napětí v distribučních sítích NN pomocí distribučních transformátorů s OLTC technologií a sériových transformátorů napětí na základě distribuovaného měření. Správné nastavení velikosti napětí ovlivňuje nejen správnou činnost a životnost elektrických spotřebičů, ale také velikost technických ztrát. Problémy spojené s decentralizovanými zdroji se nejvíce projeví ve venkovských a rozlehlých sítích NN.

## 2 CHARAKTERISTIKA STÁVAJÍCÍHO STAVU

V současné době platí pro distribuční síť nízkého napětí jmenovité hodnoty 230 V mezi fází a středním vodičem a 400 V sdružené napětí mezi fázovými vodiči v případě 4vodičové sítě. Nejvyšší hodnota napětí se nachází na sekundární straně transformátoru a klesá přímo úměrně se vzdáleností v důsledku úbytků napětí na distribuční lince. Toto tvrzení platí za předpokladu, že v síti není připojen zdroj. Udržení velikosti napětí se zajišťuje pomocí nezbytných kritérií jako jsou:

Z hlediska návrhu [3]:

- Volba správné topologie
- Správné dimenzování transformátorů
- Dostatečný průřez vodičů
- Kompenzace jalového výkonu
- Respektování rozšíření sítě

Z hlediska provozu sítě [3]:

- Co nejméně vypínat síť pod zatížením
- Řízení napětí v uzlem nadřazené soustavy
- Volit správně místa rozpojení vedení

Pro lepší pochopení problematiky a komplexnosti řízení napětí si popíšeme stručně jak vypadá regulace v jednotlivých vrstvách ES.

### 2.1 Koncepce regulace napětí v DS

Změny napětí v elektrizační síti je důležité udržovat v určitých mezích. V přenosové síti je důležité udržovat horní mez napětí která je dána izolací, koronou, elektromagnetické kompatibility a další. Dolní mez v přenosových sítích udržujeme zejména z důvodů větších ztrát na přenosu a možnosti regulace v distribučních sítích. V distribučních sítí se meze dodržují hlavně z důvodu optimální funkce spotřebičů [10].

Povolené odchylky napětí v ES dle normy EN 50160 zní takto [11]:

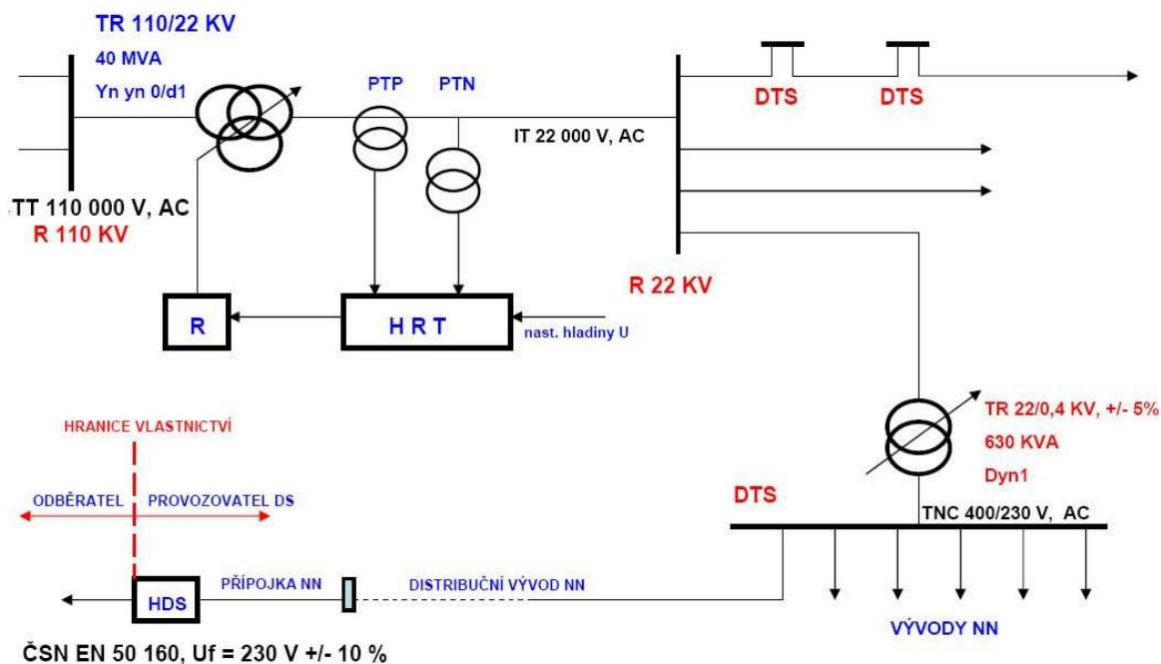
*„– musí být během každého týdne 95 % průměrných efektivních hodnot napájecího napětí v měřicích intervalech 10 minut v rozsahu  $U_n \pm 10\%$ ;*

*– všechny průměrné efektivní hodnoty napájecího napětí v měřicích intervalech 10 minut musí být v rozsahu  $U_n +10\%/-15\%$ .“*

Pro všechny hladiny vyjma u nás nejvyšší přenosové 400kV, kde je možná odchylka  $\pm 5\%$ , platí  $\pm 10\%$  z jmenovité hodnoty napětí.

### 2.1.1 Regulace U/Q v distribuční soustavě

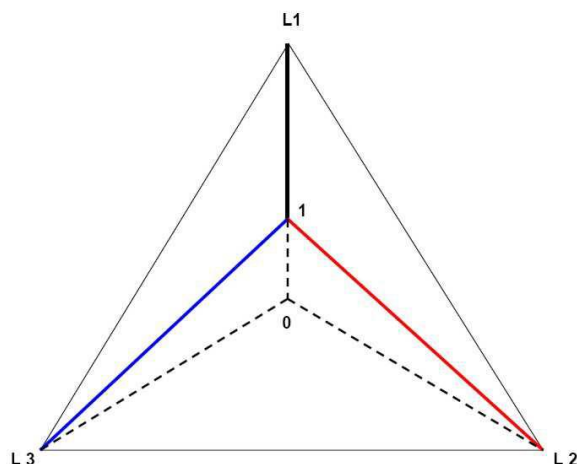
Pro regulaci napětí jsou využívány jsou zde využívány prostředky dostupné v DS. Těmi jsou transformátory VVN/VN a generátory připojené na VVN straně. V pilotních uzlech 110 kV je velikost napětí dodržována pomocí nadřazeného systému ARN. V uzlových oblastech pak zdroji připojenými do hladiny VVN a hladinovým regulátorem regulačního transformátoru VVN/VN. Ty mají zpravidla k dispozici  $\pm 8 \times 2\%/vn$  nebo  $\pm 8 \times 1,7\%/vn$ , tedy dohromady se 17 odbočkami včetně prostřední nulové odbočky [12]. Přepínač odboček umožňuje v případě větších změn zatížení, které je provázáno se změnou napětí, plynule zareagovat a přepnout o požadovaný počet odboček. Schéma distribuční sítě vidíme na obrázku 1.



Obrázek 1 - Schéma distribuční sítě VN/NN [17]

Jelikož síť 110 kV nejsou v paralelním provozu s vedeními PS, tvoří tzv. uzlové oblast 110kV, které jsou paprskovitě napojeny na PS. V těchto sítích vlivem dlouhého vedení a proměnlivé velikosti zatížení vznikají problémy vedoucí k nedodržení velikosti napětí. Jsou to problémy s nežádoucím poklesem napětí na koncích dlouhých vedení a vliv nesymetrického odběru. Pokles napětí je spojen s velikostí impedance, která narůstá s délkou vedení a způsobuje tak úbytek napětí podél linky. Úbytek napětí významně roste se zvyšující se zátěží. Stejná situace je i v sítích VN a nejzávažnější je situace na paprsku NN, kde jsou předávací místa ve venkovských sítích s nízkým osídlením často velmi impedančně vzdáleny.

Nesymetrie odběru je dána nestejným zatěžováním fází linky a vede k deformaci fázových napětí. Na obrázku 2 máme zobrazen stav, kdy jedna ze 3 fází, zde konkrétně L1, je zatížena více než ostatní. Nastává zde pokles napětí postižené fáze a posuv uzlu hvězdy do bodu 1. Naopak u nezatížených fází může vzniknout přepětí. Za normálních provozních podmínek musí být dle EN 50160, v libovolném týdenním období 95% desetiminutových středních efektivních zpětné složky napájecího napětí v rozsahu 0-2% sousledné složky. Ve výjimečných případech 3%.



Obrázek 2 - Vliv nesymetrie odběru na napětí [17]

## 2.2 Současný stav regulace napětí NN

Regulace v síti NN není v systému automatické regulace napětí. Také do sítě NN nebývají zapojeny zdroje, které jsou schopny regulace svorkového napětí. Regulace nízkého napětí je dána přepínáním odboček distribučního transformátoru na straně vysokého napětí. Transformátory vyrobené dříve mají převod napětí  $22 \pm 5\% / 0,4$  kV, novější jsou vyráběny s převodem  $22 \pm 2 \times 2,5\% / 0,4$  kV popřípadě  $22 \pm 2 \times 2,5\% / 0,42$  kV. Zvolení správné odbočky je nastaveno při beznapětovém stavu před uvedením transformátoru do provozu. Pro přenastavení odbočku se musí příslušný uzel vypnout. Změna odbočky za provozu není možná, a tedy regulace je poplatná pouze na delší časové úseky. V současné době žádná norma neurčuje velikost napětí na výstupní straně VN/NN transformátoru [2]. Napětí na sekundární straně bývá přibližně o 5% vyšší oproti napětí jmenovitému z důvodu pokrytí úbytku napětí na transformátoru.

Výpočet napětí na sekundární straně transformátoru je ve vzorci 2.1 je dle [12]:

$$u_2 = u_1 + \delta u_t - \Delta u_T \quad (2.1)$$

kde je

$u_1$ [%]	napětí na primární straně transformátoru
$u_2$ [%]	napětí na sekundární straně transformátoru
$\delta u_t$ [%]	odchylka a napětí daná pevně nastavenou odbočkou regulace
$\Delta u_T$ [%]	úbytek napětí na transformátoru

Pak úbytek na transformátoru je dán vzorcem č. 2.2:

$$\Delta u_T = \frac{u_1 - u_2}{u_2} \cdot 100 \text{ (%;V,V)} \quad (2.2)$$



Nebo dle vzorce 2.3 podle zdroje [18]:

$$\Delta u_T = \left( r \cdot i \cdot \cos\varphi + x \cdot i \cdot \sin\varphi + \frac{1}{2} (x \cdot i \cdot \cos\varphi + r \cdot i \cdot \sin\varphi)^2 \right) \cdot 100 \quad (2.3)$$

kde:

$r$ [-]	poměrná podélná reaktance transformátoru
$x$ [-]	poměrná podélná induktance transformátoru
$i$ [-]	poměrná proudu
$\varphi$ [°]	fázový posuv napětí a proudu

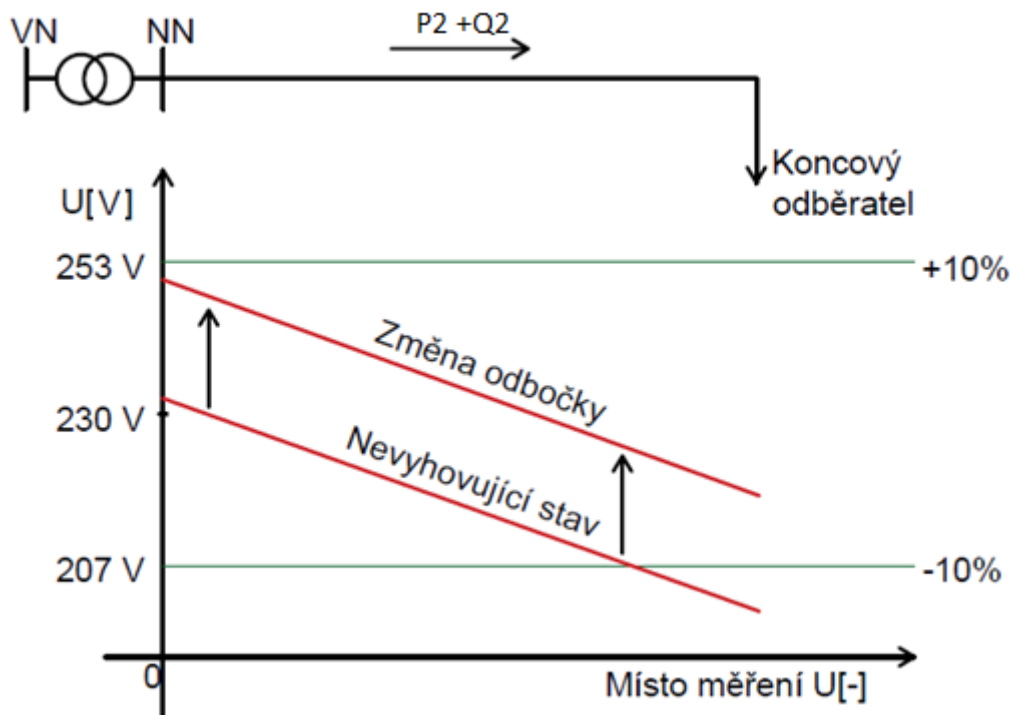
Na obrázku 3 můžeme vidět příklad změny soudobého profilu napětí pomocí manuálního přenastavení odboček transformátoru. Profil je závislý na úbytku napětí vlivem impedance a zatížení.

Úbytek napětí dle vzorce 2.3:

$$\Delta U = R_k \cdot l \cdot I \cdot \cos\varphi + R_k \cdot l \cdot I \cdot \sin\varphi \quad (2.4)$$

Kde:

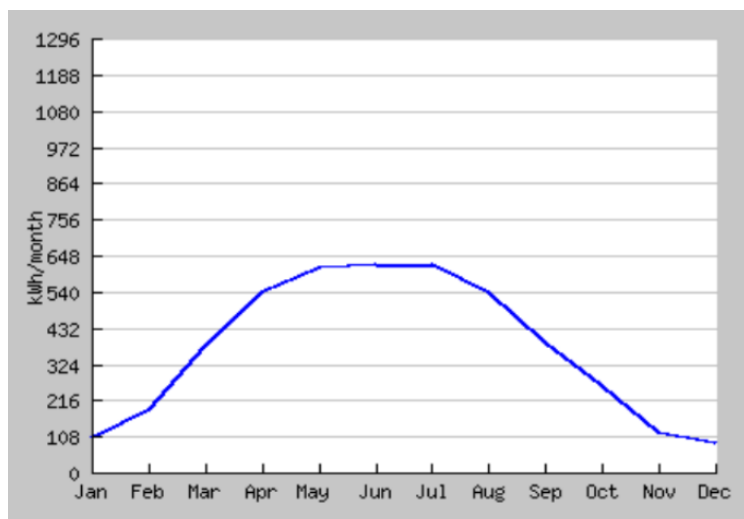
$\Delta U$ [V]	poměrná podélná reaktance transformátoru
$R_k$ [ohm]	poměrná podélná reaktance transformátoru
$X_k$ [ohm]	poměrná podélná induktance transformátoru
$I$ [A]	absolutní hodnota proudu



Obrázek 3 - Průběhy změny soudobého profilu napětí pomocí přepínání odboček transformátoru

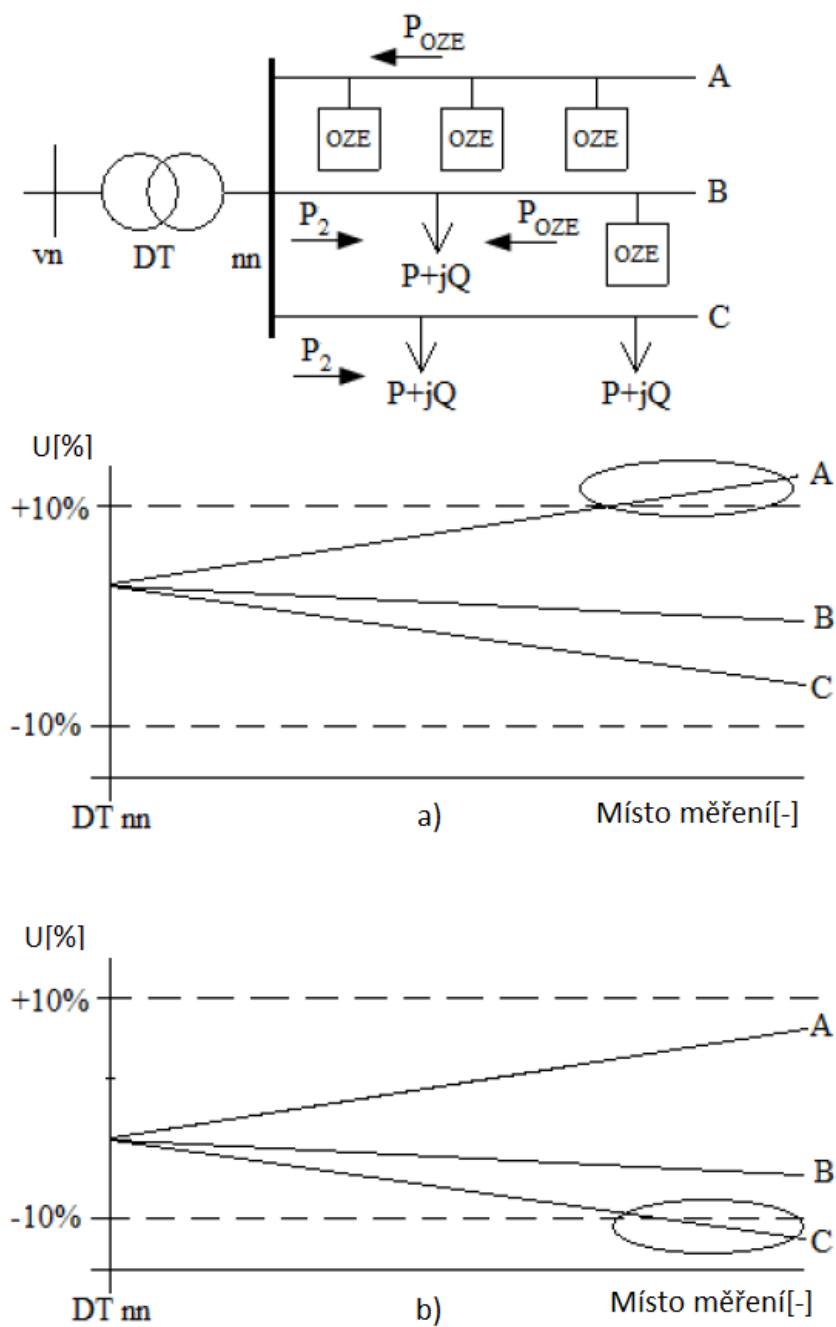
## 2.3 Nepříznivé vlivy disperzních zdrojů v DS

Pokud se do distribuční sítě připojí zdroj výroby, dojde k injektování výkonu. Je tak příčinou narušení koncepce stávajícího jednosměrného toku energie a může docházet k nežádoucím jevům, jakou jsou přetoky výkonů nebo zvýšení napětí nad dovolenou mez. Dalším nezanedbatelným vlivem je dynamika sítě. Jedná se o skokové nebo postupné změny velikosti připojeného příkonu. Současná síť NN není schopna jakékoliv reakce. Obnovitelné zdroje, zejména pak FVE a VTE jsou silně závislé na klimatických podmínkách. Velikost dodávaného výkonu je tudíž v průběhu dne, různých ročních období a klimatických vlivů značně rozdílná. Jak můžeme vidět z Obrázku 4, kde je zobrazena pro příklad roční diagram dodávky energie vyrobené z FTE.



Obrázek 4 - Diagram výroby elektrické energie FVE v průběhu roku

Pokud je výkon vyrobený OZE vyšší než spotřeba v daném místě, změní se nám schéma na dodávku ze dvou stran a může nám vzrůst napětí ze strany OZE, které klesá po směru výkonu. Příklad typického stavu při zapojení distribuované výroby v případě, kdy máme síť s více radiálními vývody můžeme vidět na obrázku 3. V tomto případě, pokud OZE dodává výkon do sítě a je větší než spotřeba v daném místě dochází ke změně směru toku výkonu. V obrázku 5 část a) vidíme že ve v radiálním vývodu A dochází k přepětí z důvodu generaci OZE. V ostatních vývodech je velikost napětí v pořádku. Pro případ b) jsme se pokusili pomocí přepnutí odbočky dostat napětí do normy. Z důvodu, že rozdíly úbytků napětí jsou velké, dojde k podpětí na vývodu C a nejde najít případ, kdy přepnutí odbočky nám dá stav do mezí předepsaných normou EN 50160.



Obrázek 5 - Diagram velikosti úbytku napětí po připojení zdroje (zde OZE) do sítě s více radiálními vývody a) před přepnutím odbočky a b) po přepnutí odbočky (upraveno autorem) [31]

### 3 CÍLE PRÁCE

Tato diplomová práce se bude zabývat způsoby udržení kvality napětí v sítích NN se zaměřením na přímou regulaci velikosti napětí. Z hlediska modernizace pro udržitelný provoz sítí pro je vypracován pro Českou republiku Národní akční plán (NAP SG) zabývající se zavedením konceptu chytrých sítí tzv. Smart Grid (SG). Tato nová koncepce se zabývá mimo jiné také řešením stability velikosti napětí. Je nutné zavést nové kontrolní, komunikační a regulační mechanismy, které dokáží na změny v síti adekvátně reagovat. S ohledem na dlouhodobou udržitelnost se uvažuje o vícestupňové regulaci pro zlepšení kvality napětí. Prvním prvkem bude samotný distribuční transformátor (DTS). Tento transformátor bude vybavený na rozdíl od současných DTS, přepínačem odboček pod zátěží (technologie OLTC). Výhodou bude možnost řízení regulace odbočky transformátoru bez nutnosti odpojení příslušné linky NN. Jelikož samotný DTS není schopen zajistit regulaci napětí v požadovaných mezích ve složitějších topologiích, je v případě pokud je to nutné zařadit další pomocný regulační prvek. Jako vhodná varianta se nabízí sériové transformátory, které slouží jako regulátor napětí, které mohou být instalovány přímo ve větvích sítě.

Jako při každé efektivní regulaci, tak i v případě regulace napětí v distribuční síti je potřeba zajistit zpětnou vazbu v podobě měření. Pro zajištění měření velikosti napětí na předávacích místech můžeme využít hodnoty z fakturačních elektroměrů. V rámci NAP SG se počítá s osazením „inteligentních“ elektroměrů do roku (2025-2029). Tyto hodnoty se budou přenášet pomocí vhodné technologie a dále zpracovávat.

Pro správnou funkci těchto prvků v regulační smyčce je nutno navrhnout vhodnou řídicí strategii a algoritmy vhodné pro zajištění optimálního nastavení všech prvků regulace. Správnost jednotlivých regulačních přístupů bude ověřena pomocí simulace v programu PSCAD.

Cílem práce bude zanalyzovat přínosy a vhodnost nasazení této regulace pomocí analýzy hodnot, které budou výstupy ze simulací.

## **4 KONCEPT SMART GRID SE ZOHLEDNĚNÍM K DS [1]**

V budoucnu se předpokládá velký nárůst distribuované výroby. Tato skutečnost vyžaduje řadu opatření k zaručení spolehlivého a bezpečného provozu elektrizační soustavy. Koncept je zaměřen na efektivní využití inteligentních prvků pro řízení technologických zařízení DS. Navržený systém musí mít dostatečnou spolehlivost a schopnost zvládnutí dynamických změn jak na straně výroby, tak na straně spotřeby elektrické energie. Na základě analýzy těchto sítí byly specifikovány obecně platné požadavky na daný typ sítí.

### **4.1 Požadavky na nové sítě NN**

Pro sítě NN s vysokou hustotou osídlení (nad 50 000 obyvatel) bude napájení řešeno ze dvou a více napaječů VN, kvůli funkci vzájemného zálohování. V lokalitě s velkými požadavky na bezpečnost a velkým měrným zatížením se může volit mřížová síť. Sítě NN budou standardně kabelové a budou splňovat N-1 kritérium.

Pro sítě v oblastech s nižším počtem obyvatel (50000-500 obyvatel) bude platit totéž, co pro sítě s vysokou hustotou osídlení. Můžeme zde dle konkrétního případu volit napájení z jednoho napaječe VN. Zde se již nemusí uplatňovat N-1 kritérium. Topologie nových sítí s počtem obyvatel více než 5000, by se měla připravit na budoucí implementaci automatizačních prvků.

Pro sídelní útvary s počtem obyvatel méně než 500 obyvatel se bude využívat základní paprsková topologie sítě a vedení může být i smíšené (kabel/venkovní).

### **4.2 Opatření pro začlenění distribuovaných zdrojů**

Provozovatelé PS a DS musí zajistit trvalé sledování vývoje počtu zdrojů připojovaných k ES. Dále je zde potřeba neustále zajišťovat vývoj pravidel provozu ES z hlediska narůstajícího počtu těžko predikovatelných zdrojů, které mají závislou dodávku energie na počasí (OZE). Také se musí sledovat jejich dopad na říditelnost soustavy a redukovat následky z narůstajícího poměru zdrojů se střídači oproti točivým zdrojům. Je nutností zajistit měření ve všech důležitých bodech a vyhodnocování jevů, jako jsou: změna velikosti napětí a zpětné vlivy statických zdrojů především s ohledem na harmonické zkreslení. Měření v distribuční soustavě bude probíhat na sekundární straně všech DTS (P,Q,U,I) a v nutných případech může být instalováno i zařízení na vyhodnocení kvality elektrické energie. Také budou monitorovány veličiny indikující provozní stav transformátoru včetně všech parametrů důležitých pro vyhodnocení měření v rámci konfigurace sítě. Potřebná dispečerská data budou přenášena „on-line“ se zajištěním priorit před ostatními daty. Data se budou přenášet buď bezdrátově (mobilní sítě), nebo přenosem informací po silovém zařízení VN - PLC. V některých případech může být použita i komunikace optickým kabelem.

Počítá se také s kompletní výměnou elektroměrů za elektronické. Rychlost výměny starých elektroměrů bude závislá především na vývoji cen elektronických měřících zařízení. V první vlně výměny těchto elektroměrů se uvažuje o nasazení těchto elektroměrů bez komunikačních modulů, z důvodu, že není ještě vytvořen komunikační standart pro měřící zařízení inteligentních systémů. Také je nutné vytvořit standart pro vybavení elektroměrů, jako jsou limittery, odpojovače apod.

Pro dispečerské řízení bude použití elektroměrů omezené. Například se může jednat o indikaci beznapětového stavu nebo pro operativní účely řízení v reálném čase. To však bude závislé na technických parametrech komunikace a na ceně zařízení. Hlavními parametry budou rychlost, spolehlivost a kapacita přenosu. Musí se počítat navíc s kybernetickou a elektromagnetickou bezpečností přenosu.

Pro řešení ovlivňující kvalitu elektrické energie se jeví jako vhodné nasazení regulačních transformátorů OLTC nebo linkových kondicionérů. Také se uvažuje využití regulace jalového výkonu z decentralizovaných zdrojů a další.

## 5 ZPŮSOBY REGULACE NAPĚTÍ V NN

K regulaci napětí se používají dva základní principy regulace. První skupinou jsou regulátory, které regulují úbytky napětí na vedení pomocí injektování proudu. Mezi ně patří například pasivní prvky L a C, SVC nebo vylepšená verze D – STATCOM apod.

Druhou skupinou jsou regulátory, které ovlivňují přímo napěťové poměry v síti. Mezi ně patří již zmíněné OLTC distribuční transformátory a linkové transformátory.

### 5.1 Napěťová regulace

První stupeň regulace bude zajištěn na úrovni DTS. Pro efektivní regulaci je zde nutné nasadit transformátor vybavený přepínačem odboček pod zatížením. Ten bude vybaven automatickým elektronickým přepínáním odboček, které bude schopno zareagovat na regulační povel jak z lokálního dispečinku, tak i na autonomní povel z regulačního systému umístěného přímo v DTS. Komunikace bude probíhat obousměrně [4]. Druhým stupněm může být linkový transformátor konstantního napětí. Tento transformátor může být nasazen ve složitějších topologiích v místech, kde bude potřeba přídatná regulace velikosti napětí. Opodstatněné použití bude mít zejména při více paralelních linek připojených na jeden distribuční transformátor.

#### 5.1.1 Transformátory OLTC

Tyto transformátory jsou nejpoužívanější zařízení pro napěťovou regulaci velmi vysokého a vysokého napětí. Změna odboček je zajištěna pomocí elektromechanických přepínačů. Tato technologie způsobuje vznik oblouků na kontaktech, což vede k degradaci kontaktů a izolačního oleje. Z tohoto důvodu nebylo možné jejich plošné nasazení v distribuční soustavě [5].

Rozvoj elektronických OLTC je potenciálním řešením pro regulaci napětí v sítích SG. Tyto zařízení mohou zvýšit stabilitu napětí a zároveň jsou daleko levnější a efektivnější než transformátory s elektromechanickými přepínači. Nasazení těchto transformátorů má velký smysl v sítích s nepredikovatelnými zdroji připojenými k distribuční soustavě a mohou zajišťovat regulaci pomalejších dynamických změn v síti způsobené těmito zdroji [5].

OLTC transformátory zvýší kapacitu sítě tím že upravují velikosti napětí. Obnovitelné zdroje energie mohou díky úpravě velikosti napětí dodat vyšší nebo plný činný výkon. Není nutné upravovat měniče pro výkonové omezení nebo poskytovat externí systémy kompenzace jalového výkonu, který by se bez nasazení OLTC transformátoru musely nasadit [32].

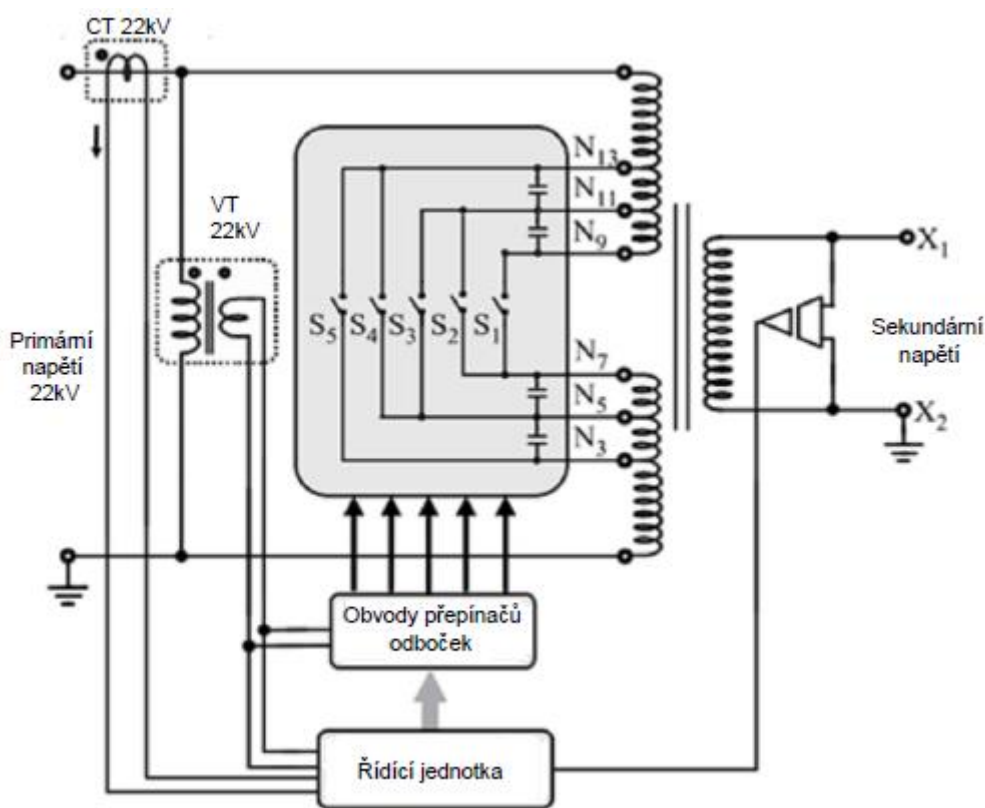
##### 5.1.1.1 Transformátor OLTC s elektronickými přepínači

Na obrázku 6 můžeme vidět schéma funkce OLTC transformátoru s elektronickými přepínači. Měření na primární straně probíhá napěťovými a proudovými transformátory, které nám upraví velikosti napětí a proudu na hodnoty se kterými může pracovat vyhodnocovací systém. Systém změny odbočky pracuje tak, že v žádném případě nezůstává obvod rozpojen. Přepínání probíhá způsobem, že se při přepnutí vždy překrývají dva přepínače. Celý proces přepnutí by měl být co nejkratší kvůli eliminaci působení zkratových proudů během této operace. Měřicí transformátor proudu měří primární proud a poskytuje informaci o průchodu proudu nulou. Při průchodu nulou můžeme zajistit nulový proud při změně odbočky a vyhneme se tak velkým zkratovým proudům.

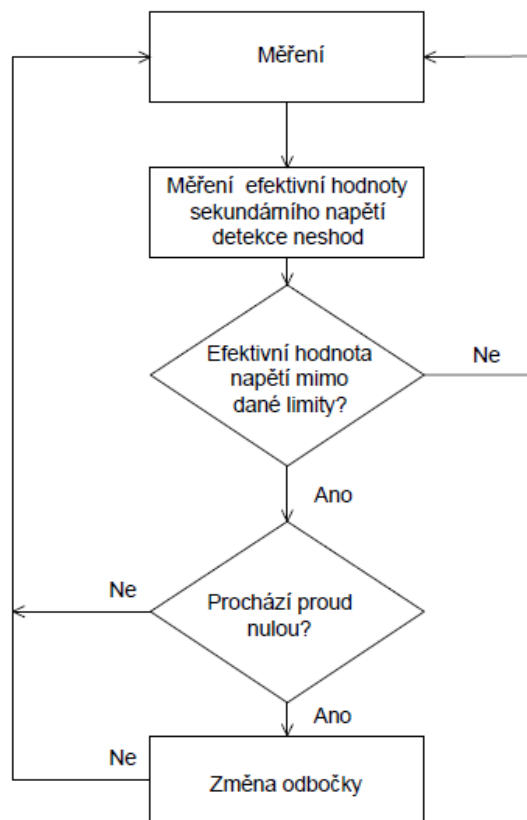


Přepnutí odboček realizováno pomocí vakuových stykačů. Toto zapojení je použito jako obousměrný spínač [5]. V případě přepínání odboček pomocí vakuových spínačů se životnost přepínače pohybuje 700 000 až 2 000 000 přepnutí. Podle pilotního projektu od firmy Siemens bylo při nasazení v síti s VTE a FVE četnost přepnutí odboček 2,7 – 5 za den. Tedy systém přepínání s vakuovými stykači má dostatečnou životnost [6].

Sekundární napětí bude měřeno a porovnáváno s referenční hodnotou v ovládacím systému. Ovládací systém se stará o zajištění úrovně sekundárního napětí v požadovaném rozsahu. Propojení mezi tímto systémem a přepínači je přes optickou komunikaci. Přepínače musí být navrženy na stejnou hodnotu napětí jako distribuční transformátor, tedy 22kV. O celé řízení se stará mikroprocesor. Zjednodušený řídicí diagram regulace můžeme vidět na obrázku 7.



Obrázek 6 - Principiální schéma transformátoru OLTC– upraveno autorem [5]



Obrázek 7 - Zjednodušený diagram funkce regulace Smart transformátoru – upraveno autorem [5]

Systém regulace OLTC transformátorem, tak jako u DTS bez možnosti přepnutí při zatížení, má své limity dané rozsahem regulace. Rozsah bude záviset dle specifikace daného OLTC transformátoru. V pilotním projektu uvedeném ve zdroji [6] se nachází OLTC transformátor značky Siemens s výkonem 630 kVA a schopností regulace  $\pm 4,57\%$ .

Technologie přepínání odboček je již na požádání k dispozici u většiny výrobců transformátorů. Pověšinou je doplněn transformátor VN/NN při výrobě přepínačem odboček jiné firmy. Pokud se máme zabývat regulací napětí NN musíme znát parametry přepínačů odboček s ohledem na regulační schopnosti, jako jsou maximální krok napětí nebo regulační zpoždění. Velmi málo výrobců transformátorů poskytuje informace o parametrech jejich přepínačů odboček a zvolené technologii. Nejdetailněji popisuje svůj přepínač odboček německá firma Reinhausen u svých přepínačů odboček ECOTAP VPD, které jsou určeny přímo pro náš případ. Z hlediska regulačních schopností nás zajímá čas regulace, který je průměrně 300 ms. Nejkratší možný čas mezi dvěma spínacími operacemi je 3 s. Dále je zde uveden transformátor TRanforma.smart od firmy Ormazabal, který nemá sice v katalogovém listě uvedeny detailní parametry přepínačů odboček, ale odkazuje se na standart IEC 60214 pro přepínače odboček, který splňuje [20][21]. Parametry transformátorů jsou uvedeny v tabulce 1.

Tabulka 1 - Parametry přepínačů odboček [20][21]

TYP	VPD III 30	VPD III 100	TRanforma.smart
Maximální jmenovitý proud (výkon)	30A	100A	Až 800kVA
Nejvyšší napětí	36 kV		24kV
Maximální jmenovitý krok napětí	825V		600V
Maximální počet odboček	9		9
Jmenovitá frekvence	50/60Hz		-
Maximální počet spínacích operací	500 000		-
Tlak během spínací operace	0,7...1,4bar		-
Čas spínací operace	Průměrně 300 ms		-
Nejkratší čas mezi dvěma operacemi	3s		-
Izolace	IP 54		-

Ostatní výrobci povětšinou deklarují pouze regulační rozsah a krok regulace napětí v procentech, a typ přepínače.

### 5.1.2 Linkové kondicionéry [24]

Tato zařízení slouží k nápravě parametrů napětí, aby vyhovovali požadavkům v místě nasazení. Pracuje na principu sériové kompenzace, kdy kompenzovanou veličinou jsou změny síťového napětí pomocí sériového transformátoru napájeného PWM měničem. Zařízení je přímo konstruované pro nasazení v odvětví NN distribuce elektrické energie. Pracuje vlastně jako stabilizátor napětí v závislosti výkyvů výkonového zatížení sítě. Tento prvek se umísťuje do míst na koncích sítě s vysokou impedancí.

#### Vlastnosti:

Kondicionér je zařízení, které může zajistit základní parametry kvality elektrické energie, a to eliminací některých rušivých vlivů v napájecí síti.

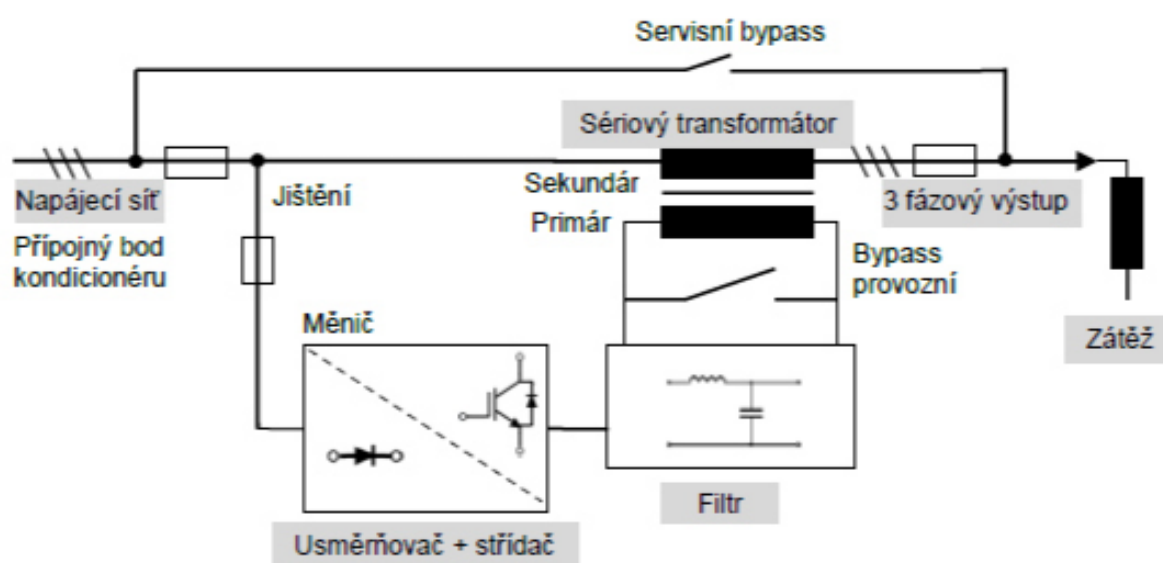
#### Funkce linkových kondicionérů:

- Vyrovnání poklesu vstupního napětí až do 20 % (maximálně je možné do 30 %)
- Udržování napětí v mezích 5 %
- Zpoždění méně než 0,1 s - pomalá regulace - stabilizátor napětí
- Zpoždění méně než 0,01 s - rychlá regulace - odstranění flickr

Princip:

Při snížení napětí z důvodu výkonového zatížení a měkké sítě začne napěťový kondicionér odebírat proud  $I_2$ . Tento proud je usměrněn a posláze opět rozstřídán PWM měničem. Odběrem proudu  $I_2$  je způsoben před linkovým kondicionérem ještě vyšší úbytek napětí. Z PWM měniče jde proud  $I_3$  do primárního vinutí transformátoru kondicionéru. Na výstupu z kondicionéru je napětí požadované velikosti.

Napěťový kondicionér není zdrojem energie, tudíž i regulace napětí má své meze. Pokles napětí 0 -30%  $U_n$  je považován za mez regulace principu sériové regulace napětí. Blokové schéma můžeme vidět na obrázku 9. Parametry linkového kondicioéru s výkonem 36 kVA, od firmy Elcom, vidíme v tabulce č. 2.



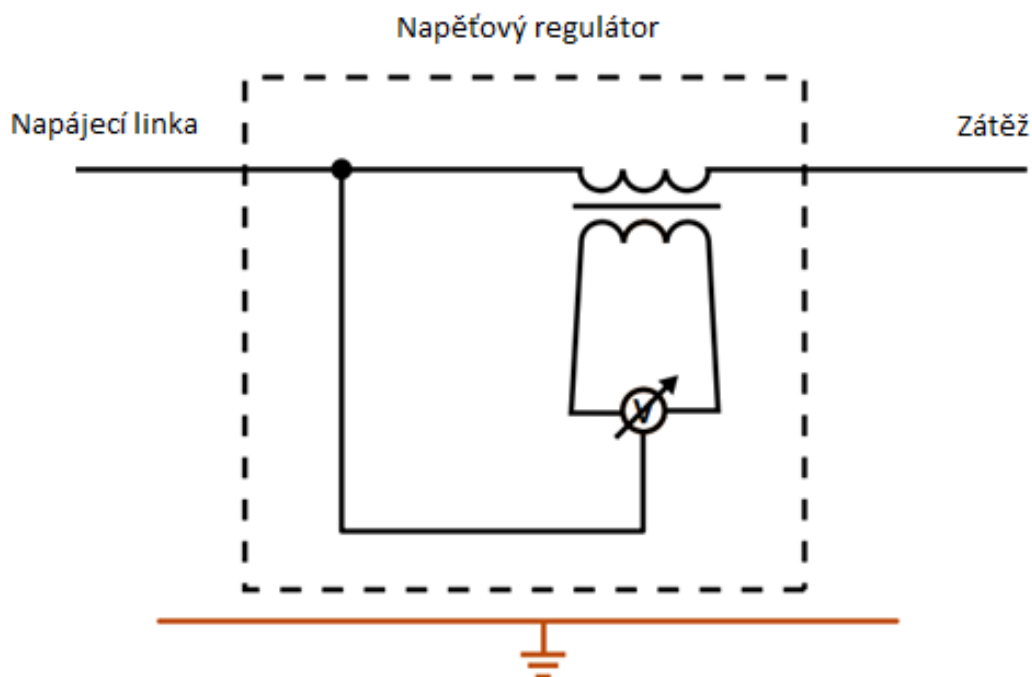
Obrázek 8 - Schéma zapojení linkového kondicionéru [22]

Tabulka 2 - Specifikace linkového kondicionéru 36 kVA od firmy Elcom [23]

Průchozí výkon	36 kVA
Jmenovité napětí	3x230V/400V
Výkon měniče	7,2 kVA
Výstupní proud	52 A
Vstupní jistič	63 A/gG
Kolísání vstupního napětí	+10 % (253 V) až -20 % (184 V)
Kolísání výstupního napětí	+10 % (253 V) až -5 % (218 V)
Přetížitelnost	1h 10% 1 min 30% 1s 100%
Kmitočet	50 Hz (volitelně 60 Hz)
Účinnost	> 97 %
Provedení	Venkovní (volitelně vnitřní)
Rozměry (v x š x h)	1200 x 1050 x 600 mm

### 5.1.3 Linkový regulátor ABB [23]

Firma ABB nabízí řešení fluktuací napětí svým linkovým regulátorem. Tento regulátor pracuje na principu sériové kompenzace napětí spolu s mechanickými přepínači. Výrobce uvádí ztráty menší než 1%. Mezi hlavní výhody patří možnost autonomního i dálkově ovládaného řízení a rychlost instalace. Regulaci lze nastavit na pevnou, předem zadanou velikost napětí nebo nastavení velikosti napětí v závislosti na zátěži. Principiální schéma můžeme vidět na obrázku 10.



Obrázek 9- Schéma napěťového regulátoru [23] (upraveno autorem)

Parametry regulátoru můžeme vidět v tabulce 3;

Tabulka 3 - Specifikace linkového regulátoru ABB [23]

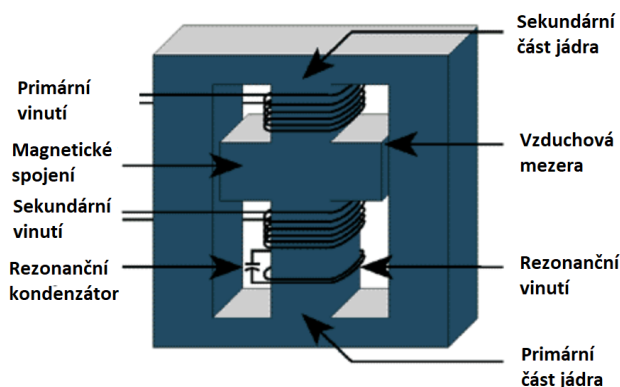
Jmenovitý výkon [kVA]	63, 125, 250
Frekvence [Hz] / počet fází	50/3
Napětí [V] (fáze-fáze / fáze-zem)	400/230
Počet odboček	11
Celkový regulační rozsah	+/-6
Krok odbočky	1,2% (+/-5 x 1,2 %)
Životnost přepínače	Více jak 1 000 000
Ztráty [W]	Ztráty závisí na velikosti zatížení a dané odbočce. Pro 250 kVA: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Max. 900 W na maximální 6% regulaci</li> <li>- 80 W bez zatížení</li> </ul>

### 5.1.4 Sériové transformátory – CVT

Transformátory konstantního napětí (CVT) mají možnost širokého uplatnění zejména tam, kde je důležité zlepšit parametry síťového napětí. Tyto transformátory s galvanickým oddělením pracují v saturačním módu, přičemž rezonanční vinutí je v rezonanci s připojeným kondenzátorem. Schéma zapojení transformátoru můžeme vidět na obrázku 11. Tento transformátor zajišťuje stabilní výstupní napětí bez napěťových špiček a vyšších harmonických. CVT dokáže odfiltrovat harmonické zkreslení až do THD cca 30% [8]. Velikost výstupního napětí do jisté míry nezáleží na velikosti vstupního napětí viz. obrázek 8. Další výhodou je bezúdržbový provoz přes 200 000 hodin ~ 22let [6].

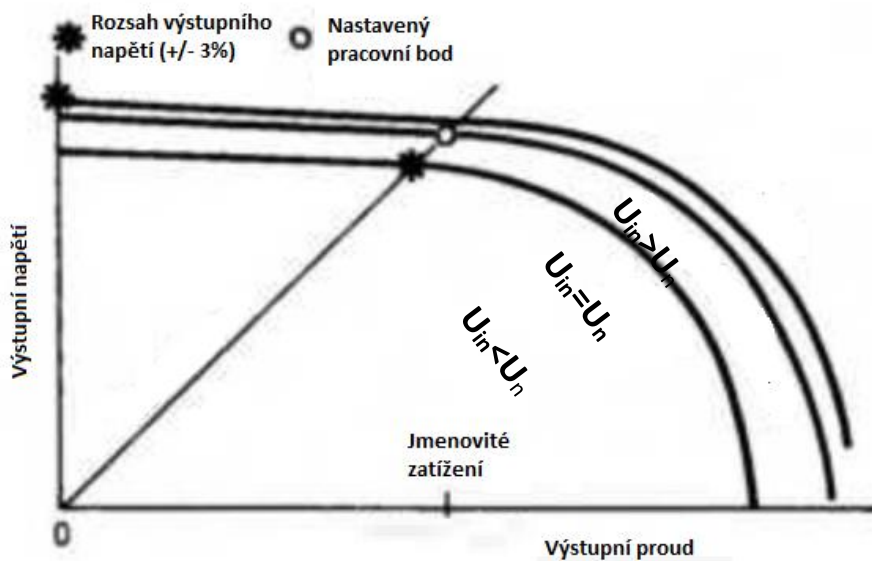
Při použití transformátoru může být vstupní napětí až  $\pm 15\%$  od nominální hodnoty automaticky převedeno na výstupní stabilizované napětí  $\pm 3\%$  [6].

Hlavním omezujícím faktorem CVT je jeho jmenovitý výkon. V současné době CVT dosahují výkonů maximálně okolo 50kVA a pracují s účinností kolem 90%.



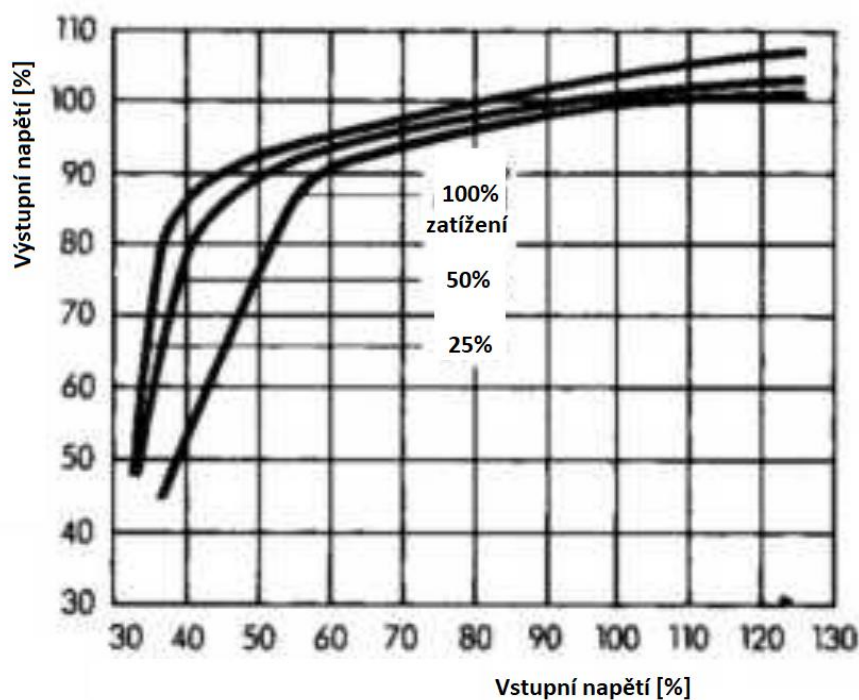
Obrázek 10 - Schéma CVT (upraveno autorem) [8]

Velikost výstupního napětí je závislá na velikosti zatížení. Zatěžovací charakteristika CVT je zobrazena na obrázku 12. Jak můžeme vidět z této charakteristiky, je regulace velmi náchylná na přetížení a velikost výstupního napětí pak klesá exponenciálně k nule.



Obrázek 11 - Zatěžovací charakteristika CVT (upraveno autorem) [8]

Průběh závislosti napěťové stabilizace v závislosti na velikosti vstupního napětí a na velikosti zátěže můžeme vidět z charakteristiky na obrázku 13. Z obrázku je patrná značná regulační schopnost transformátoru pracovat opravdu širokým rozsahem vstupního napětí.



Obrázek 12 - Závislost výstupního napětí na vstupním napětí (upraveno autorem) [8]

## 6 MĚŘENÍ A PŘENOS DAT

Tak jako každá regulace, i koncept napěťové regulace v sítích NN se nemůže obejít bez zpětné vazby, tedy měření. Dle NAP SG bude dokončena výměna elektroměrů a zavedení technologie „inteligentního měření“ v roce 2025-2029. Bohužel zatím nejsou definovány přesné specifikace, které budou muset tyto elektroměry splňovat. Nasazené inteligentní měřicí přístroje bude možno využít nejen pro fakturační údaje, ale i jako zdroj informací o chodu sítě. Pro regulaci je důležitá primárně informace o napětích na předávacích místech.

### 6.1 Měření

V našem případě budeme předpokládat měření napětí, které budou odesílány jako agregované hodnoty v intervalech minut. Měřicí vrstva bude komunikovat s řídicí vrstvou pomocí zvoleným typem komunikace. V dnešní době se nabízí více druhů komunikace, která by se pro odečítání hodnot z elektroměrů dala použít, v naší práci si vybereme dva pro porovnání, a to bezdrátová komunikace pomocí LTE nebo jiného standartu přenosu dat poskytovaných telekomunikačními sítěmi a přenos po silovém zařízení distributora – PLC.

Od elektroměrů do budoucna můžeme očekávat měření 10 min agregovaných hodnot napětí nebo kratších. Pro měření bude požadovaná dostatečná přesnost, která je předpokladem pro správnou regulaci.

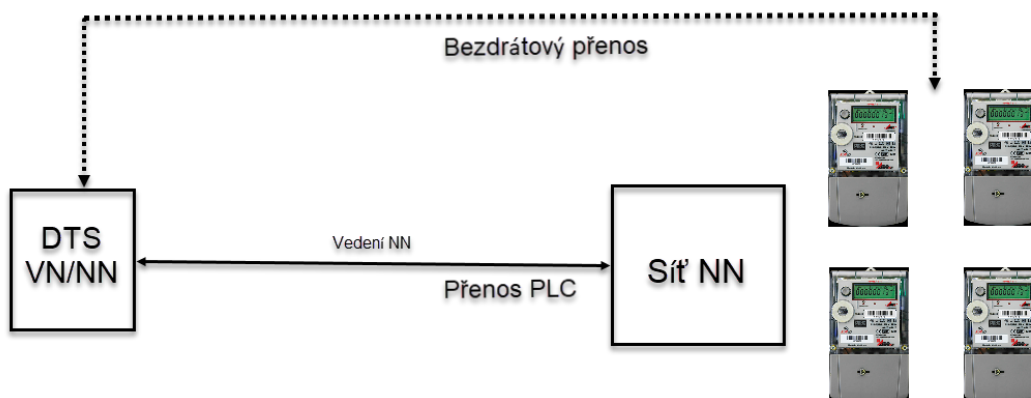
V sítích NN bude možnost zjišťovat velikost napětí díky nasazení digitálních elektroměrů s komunikací na každém předávacím místě. Jen tak získáme detailní přehled o dění v síti z hlediska velikosti napětí. Pokud elektroměry nebudou plošně nasazeny, je možné definovat měřením nejhorší místa v síti náchylné na poklesy nebo naopak vzrůst napětí. Tato místa můžeme očekávat na koncích linek, nebo v blízkosti zdroje připojeného k síti NN.

### 6.2 Komunikace pro správnou funkci regulačního schématu

Ve volbě komunikace mezi měřicími přístroji a koncentrátorem musíme zohlednit některé vlastnosti. Komunikace by měla být rychlá, spolehlivá a co nejlevnější.

Komunikace mezi elektroměry bude tedy buď bezdrátově nebo po silovém vedení. Z hlediska komunikace jsou důležité parametry jednotlivých komunikačních rozhraní. Schéma tohoto přenosu můžeme vidět na obrázku 13.





Obrázek 13 – Blokové schéma přenosu mezi elektroměry a DTS

### 6.2.1.1 Bezdrátové posílání dat

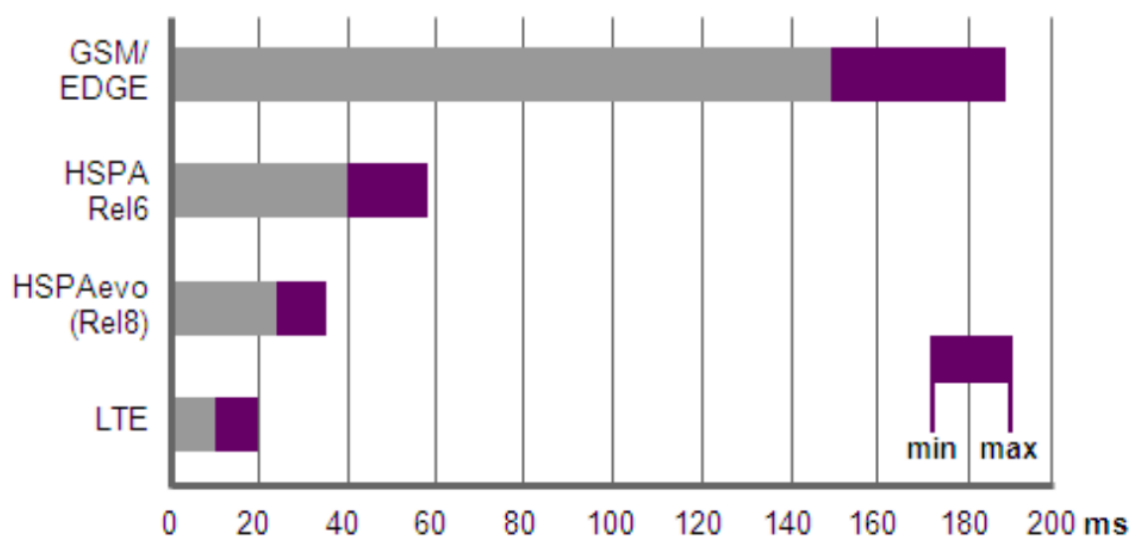
Posílání dat po mobilní síti je problematické skrze neustálý vývoj, pořizovací cenu a také cenu za přenos. Platí, že čím vyšší frekvence odečtů, tím vyšší objem přenesených dat, a tudíž vyplývající vyšší náklady na přenos. Každé zařízení potřebuje ke svému provozu svou vlastní kartu SIM. Na druhou stranu je výhodou výborné pokrytí území ČR. Například operátor Vodafone na území ČR garantuje pokrytí 3G internetem 99 % [14].

Maximální rychlosti nyní používaných datových sítí vidíme v tabulce 4.

Tabulka 4 - Rychlosti přenosu dat mobilních sítí [13]

Symbol	Standart	Poznámka	Přijímání (download)	Odesílání (upload)
E	EDGE	-	217,6 Kbits/s	108,8 Kbits/s
3G	UTMS	-	384 Kbits/s	128 Kbits/s
H	HSPA	-	7,2 Mbits/s	3,6 Mbits/s
H+	HSPA+	Release 6	14,4 Mbits/s	5,76 Mbits/s
H+	HSPA+	Release 7	28 Mbits/s	11,5 Mbits/s
H+	HSPA+	Release 8	42,2 Mbits/s	11,5 Mbits/s
H+	HSPA+	Release 9	84,4 Mbits/s	11,5 Mbits/s
H+	HSPA+	Release 10	168,8 Mbits/s	23 Mbits/s
4G	LTE	-	100 Mbits/s	50 Mbits/s
4G	LTE-A	Advanced	1 Gbits/s	500 Mbits/s

Při komunikaci musíme uvažovat také zpoždění. Pro nejnovější LTE sítě uvádí zdroj [29] zpoždění maximálně 20 ms. Hodnoty dalších typů sítí můžeme vidět z grafu na obrázku 14.

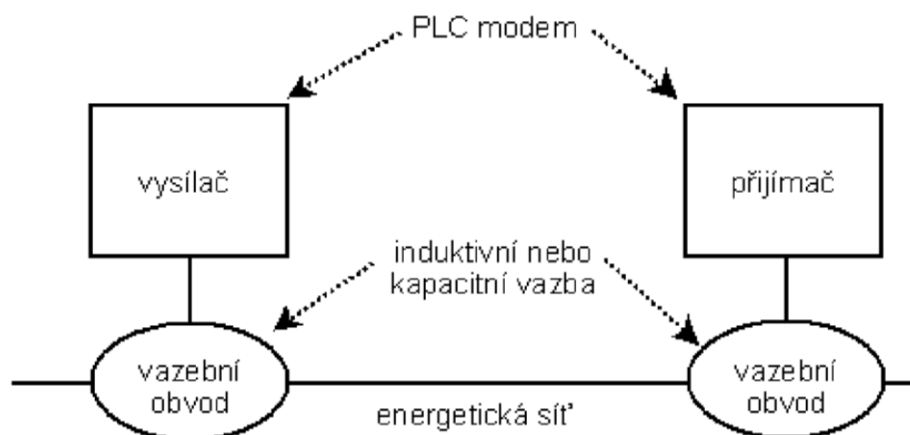


Obrázek 14- Rychlosti RTT pro bezdrátové mobilní sítě [29]

### 6.2.1.2 PLC

Pod zkratkou PLC se skrývá celý název Power Line Communication. Dá se přeložit jako „komunikace po silových rozvodech“ a znamená širokopásmovou nebo úzkopásmovou obousměrnou komunikaci. Znamená to že na frekvenci 50 Hz jsou vhodně namodulovány vyšší frekvence, díky kterým můžeme po silovém vedení posílat binární data. Princip přenosu injektování modulovaného signálu přes induktivní nebo kapacitní vazbu můžeme vidět na obrázku 15. V praxi je již využívána například pro hromadného dálkového ovládání. Díky zdokonalení této technologie se nabízí používat tuto službu pro telemetrii a automatizaci. Každé zařízení připojené k silovému vedení musí být vybaveno rozhraním PLC. Schéma přenosu po PLC je zobrazen na obrázku 15. Velkou výhodou technologie PLC je fakt že přenosová infrastruktura zůstane stávající což snižuje náklady na instalaci. Pro komunikaci elektroměrů a DTS se jeví jako ideální. Například ve Francii byl zahájen projekt, který zahrnuje nasazení 35 milionů inteligentních elektroměrů a pro komunikaci byla vybrána právě technologie PLC [25].

Systémy komunikace PLC podléhají Evropské normě EN 50065. Dle Cenelec je dostupné pro úzkopásmové PLC v oblasti 3 až 148,5 kHz. Energetické společnosti smí využívat pro své datové přenosy pásmo Cenelec A do 95 kHz [28].



Obrázek 15- Principiální přenos dat PLC [15]

### 6.2.1.3 Přenosové rychlosti PLC

Modemy pro PLC komunikaci mají konstrukční rychlost okolo 200Mbps, avšak jejich reálná rychlost je o více než 70% nižší [15]. Rychlosti přenosů jsou uvedeny v tabulce 5.

Tabulka 5 - Přenosové rychlosti PLC komunikace [16]

Technologie	Modulace	Rf pásmo	Přenosová rychlost
PLC 1.G	FSK	3-65 kHz	0,3-1,2 kbit/s
PLC 2.G	BPSK, S-FSK	3-65 kHz	2,4-3,6 kbit/s
PLC 3.G	OFDM	3-65 kHz	22-128 kbit/s
BPL	OFDM	1,8-18 MHz	1-5 mbit/s

Rychlosti odezvy RTT můžeme uvažovat okolo 140 ms, avšak v případě rušení se může dramaticky zvýšit až do úplné ztráty schopnosti komunikovat [26].

### 6.2.1.4 Rušení PLC

Velkým problémem je přenosová cesta samotná. Silové vedení není samo o sobě určeno k přenosu vysokofrekvenčního signálu. Rušení může být krátkodobé do 200ms, kde můžeme zařadit různé přechodové děje jako například zapínání nebo vypínání nebo trvalé zdroje rušení. Trvalé zdroje rušení by se však neměli vyskytovat, pokud síť splňuje platné provozní normy sítě. Pro přehled si uvedeme některé zdroje rušení a jejich frekvenční pásmo rušení viz. Tabulka 6.

Tabulka 6 - Pásmo rušení prvků v sítích NN [15]

Zdroj rušení	Frekvenční pásmo
Rtuťová výbojka	0,1Hz – 1MHz
Zářivka	0,1Hz – 3MHz
Síťové vypínače	0,5Hz – 25MHz
Výkonové spínače	10Hz – 20MHz
Spínané síťové zdroje	0,1Hz – 30MHz

## 6.3 Zhodnocení volby komunikace

Výhodou bezdrátového systému přenosu je zcela jistě rychlost a pokrytí signálem. Nevýhodou je, že přenosová technologie není v majetku distributora a síť prochází kontinuálně obnovou, kdy staré datové služby jsou nahrazeny novými. To by vedlo k nutnosti výměny minimálně komunikačních modulů, popřípadě celých přístrojů.

Hlavní výhodou PLC je, že přenosová cesta, tedy silové vedení, je plně v majetku distributora. Během komunikace měřících prvků a koncentrátoru v DTS tedy musíme počítat s možností rušení. Je možné, že v síti se bude nacházet místo se silným rušením, které znemožní úplně přenos po silovém vedení. V takovém případě je nutné uvažovat hybridní řešení komunikace. Tedy primárně po PLC a částečně bezdrátově.

## 7 ZPŮSOB ŘÍZENÍ/REGULACE

Řízení napětí bude probíhat ve dvou úrovních. Hlavním prvkem této regulace bude transformátor s přepínáním odboček pod napětím. Jako sekundární regulace může být použit linkový regulátor. Ten bude nasazen v místech, které jsou velmi impedančně vzdáleny od DTS, tudíž jsou velmi ohroženy kolísáním napětí mimo požadované meze. Řízení bude probíhat na základě dat, které jsou agregovanými hodnotami efektivních hodnot napětí změřených v daných odběrných místech. Tyto hodnoty budou vyhodnocovány v řídicí jednotce. Vyhodnocení bude probíhat dle daného algoritmu který je založen buď na analýze napěťových profilů ve větvích sítě nebo měření výkonu, napětí a proudu na sekundární straně DTS. S vyšší prioritou budeme regulovat přepětí.

Zde si uvedeme několik variant měření, která mezi sebou porovnáme. Varianty se budou od sebe lišit složitostí a náročností na výpočet.

### 7.1.1 Manuální pevné nastavení odbočky

Toto nastavení bude velmi podobné stávajícímu stavu. Jsou možné dvě varianty – s nasazením OLTC transformátoru a s využitím stávajících transformátorů s přepínáním odboček v beznapěťovém stavu. Při použití OLTC transformátoru je velkou výhodou možnost změny odbočky pod napětím, ale kvůli vysoké ceně dovybavení transformátoru touto technologií je značně neekonomické. Cena za instalaci technologie přepínání odbočky transformátoru NN je dle výrobců transformátorů přibližně stejná jako cena vlastního transformátoru. Použití této varianty by se dalo uvažovat jako příprava pro zavedení plně automatizované regulace. Pokud by bylo nasazeno měření napětí na odběrných místech, pak bychom hodnoty mohli agregovat offline a hodnoty profilů v čase analyzovat několikrát do roka. Přepnutí odbočky by probíhalo na základě změny poměrů v síti jako jsou například rozšíření sítě nebo v závislosti na ročním období. Při tomto typu regulace bude četnost přepnutí max. v jednotkách přepnutí za rok. Tato strategie bude nevhodná pro síť se značnou volatilitou hodnot napětí, kde se hodnoty v průběhu dne blíží k oběma extrémům.

### 7.1.2 Rozhodování algoritmu na základě měření na sekundární straně DTS

Dle NAP SG bude v budoucí době nasazeno na v DTS na straně NN měření toků energie, napětí a proudu. V opodstatněných případech budou nasazeny i analyzátory kvality elektrické energie. Data mají být přenášena pomocí vhodné komunikace (bezdrátové nebo po PLC) do koncentrátoru umístěného v nejbližší transformovně VVN/VN, nebo přímo do lokálního dispečinku. Výstup z tohoto měření se dá využít jako podklad pro přepínání odboček pod zatížením. Pro rozhodovací algoritmus by však byla potřeba znalost napěťových poměrů v síti – impedanční vzdálenost odběrných míst nebo informace o výkonu připojené distribuované výroby. Rozhodovací algoritmus bude muset rozhodovat na základě určité predikce, aby byla minimalizována možnost zvýšení odchylky od požadovaných hodnot nesprávným přepnutím odbočky. Díky měření na straně NN DTS budeme mít informaci o tocích výkonu. Dle této informace můžeme rozhodovat o přepnutí odbočky. Na základě poklesu napětí na odběru můžeme určit závislost velikosti odběru na volbu dané odbočky, tzn. při vysokém výkonu se posouváme s regulací dolů a při nízkém naopak jdeme s převodem nahoru. Tato regulace má jako zpětnou vazbu pouze velikost odebíraného výkonu, tedy nemáme online informaci o dění v síti.

### 7.1.3 Rozhodování na základě měření v předávacích místech

Tento způsob napětíové regulace se jeví do budoucna jako ideální možnost při vysoké penetraci obnovitelných zdrojů při více radiálních vývodech. Měření bude probíhat v agregovaných hodnotách, které budou reprezentovat efektivní hodnoty za danou dobu. Jelikož měření bude k dispozici ideálně na všech odběrných místech, získáváme tímto měřením přehled o profilu napětí ve větvích připojených do transformovny online. Z těchto hodnot nám bude vyplývat i informace o směru toku výkonů v síti. Rozhodovací mechanismus bude pracovat s určitou necitlivostí a s časovou závislostí přepnutí odbočky podle velikosti odchylky. Protože budeme znát údaje o velikosti profilu napětí v síti, bude možné efektivní a spolehlivější regulace než v případě měření pouze na sekundární straně vinutí DTS. Hlavní důvod regulace je udržet napětí v normě. Budeme tedy brát v potaz maximální a minimální hodnotu napětí v každé fázi.

## 7.2 Místo řízení

Umístění řízení regulace bude primárně umístěno přímo v DTS. Sekundárně by měla probíhat obousměrná komunikace s lokálním dispečinkem. Řízení přepínání odboček bude probíhat autonomně.

Přímo v DTS se bude nacházet řídicí a komunikační jednotka, která bude mít na starost automatickou regulaci velikosti napětí podružné sítě, kterou napájí příslušná DTS.

Dálkové zasažení do autonomního řízení z dispečinku v případě nestandardních stavů (požadavků) bude k dispozici. Data o chodu sítě se budou odesílat do střediska distributora a ukládat pro další analýzu a budou sloužit jako podklad pro eventuální nasazení zařízení pro zlepšení napětíových poměrů v kritických místech sítě.

## 8 MATEMATICKÝ MODEL

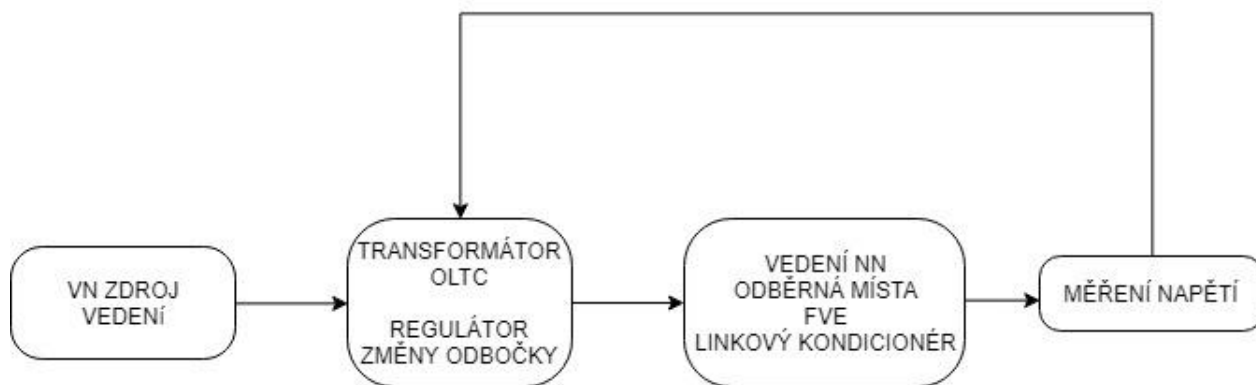
Pro modelování a simulaci byl vybrán software PSCAD (Power Systems Computer Aided Design) od firmy HVDC. Jedná se o robustní, přesný a intuitivní simulační nástroj. Pomocí systému PSCAD<sup>TM</sup> / EMTDC<sup>TM</sup> (electromagnetic transient simulation engine) můžeme vytvářet a simulovat jednoduché i složité energetické systémy s možností regulací a parametrizací komponent. Umožňuje nám schematicky nakreslit daný obvod, následně provést simulaci jeho chodu a provést analýzu výsledků. Nabízí také online vykreslování do grafů. Obsahuje knihovny předprogramovaných a otestovaných simulačních modelů a komponent od jednoduchých pasivních součástek po komplexní modely elektrických strojů nebo FACTS. Pokud model nelze sestavit předprogramovaných součástek, PSCAD nabízí možnost prostředí pro sestavení a naprogramování vlastního modelu.

Pro představu knihovna obsahuje následující druhy součástky:

- Rezistory, induktory, kondenzátory
- transformátory
- Frekvenčně závislé přenosové vedení a kabely
- Zdroje proudu a napětí
- Spínače a vypínače
- Ochrany
- Diody, tyristory
- Funkce analogového a digitálního ovládání
- stroje střídavého a stejnosměrného proudu, budiče, regulátory, stabilizátory
- měření
- HVDC, SVC a další regulátory FACTS
- Zdroj větru, větrné turbíny a regulátory

Tyto knihovny, které jsou většinou dostatečně parametrizovatelné, značně usnadňují a urychlují modelaci konkrétních energetických systémů.

V našem případě se jedná o simulaci provozu DTS 22/0,4 kV a její podružné sítě NN v průběhu jednoho dne. Jako napájení DTS namodelujeme zdroj VN, který bude přes vedení VN napájet primární stranu této DTS. DTS bude vybaven pro případ aktivní regulace namodelovanou logikou, přepínače odboček vždy naprogramovanou pro konkrétní typ regulace. Předávací místa v NN síti budou řešena jako parametrizovatelná zátěž, do které bude možno zasahovat z hlediska profilu odběru. U každého odběrného místa bude komponenta simulující elektroměr s daným agregačním časem. Z nich bude při žádaném typu regulace poskytována hodnota napětí v odběrném místě se specifikovatelnou reliabilitou poskytovaných dat. Do sítě NN bude možnost připojit prvek který nám bude simulovat FVE jako zdroj činného výkonu. Celé principiální schéma sítě můžeme vidět na obrázku 16.



Obrázek 16 - Principiální zjednodušené schéma modelu

Detailní informace o nastavení modelu sítě budou popsány v následujících odstavcích. Pro značnou složitost některých submodelů, nebudou tyto bloky rozebrány dopodrobna. Jejich funkce však bude možno ověřit v příloženém zdrojovém souboru.

## 8.1 Časová komprese

Jako časový úsek regulace byl zvolen časový úsek jednoho dne. PSCAD provádí výpočet po předem zadanou dobu. Z časových a výpočetních možností nelze simulovat dobu jednoho dne jako zadání doby simulace 86400 s. Simulace uvedeného systému by trvala pravděpodobně v řádech dnů. Je tedy nutno se uchýlit k časové kompresi.

Frekvence v naší elektrizační soustavě je stanovena na 50 Hz. Z důvodu simulace digitálních měřících přístrojů, které sbírají vzorky s dobou měřicího okna 1 s a z těchto hodnot matematickou operací vytváří průměrnou hodnotu, chceme, aby v době 1 s proběhla jeden celý sinusový průběh. Z tohoto důvodu volíme simulaci 1:50.

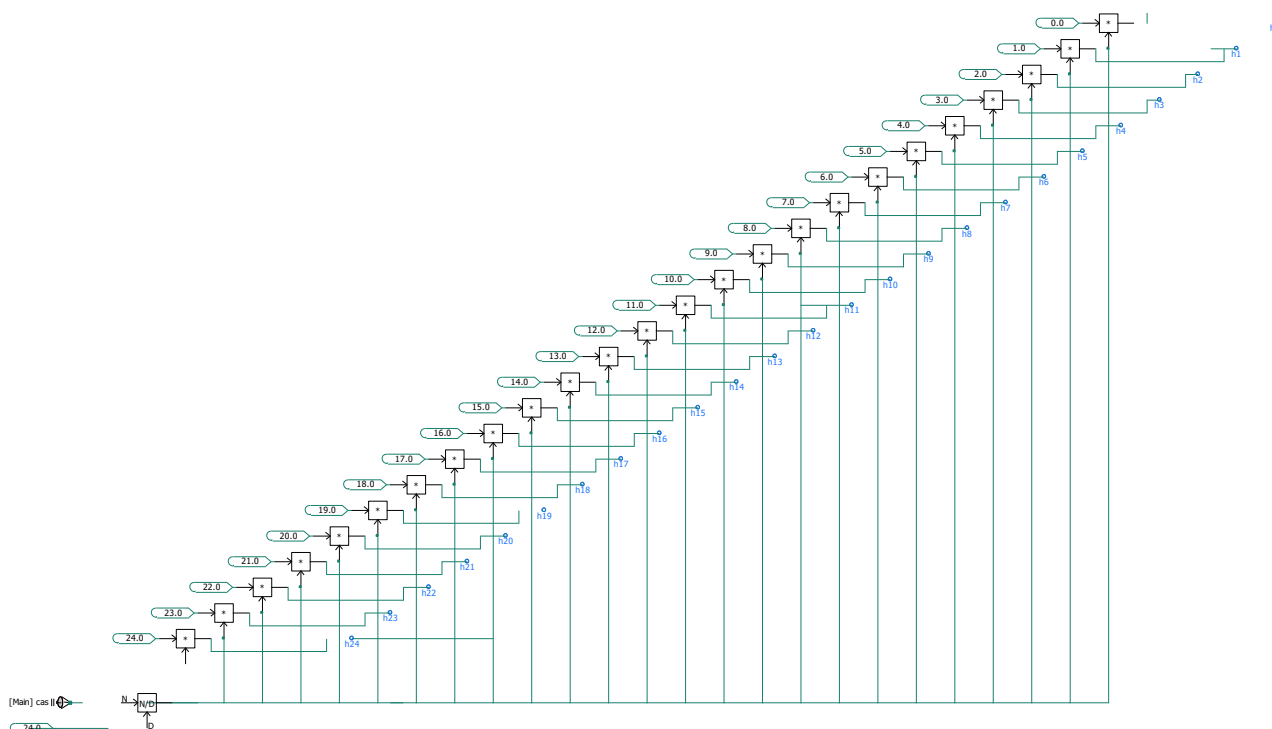
Výpočet komprimované doby období jednoho dne je uveden ve vzorcích 8.1:

$$t_{den} = h \cdot min \cdot sec = 24 \cdot 60 \cdot 60 = 86400 \text{ s} \quad (8.1)$$

$$t_{komprimovaná} = \frac{t_{den}}{50} = \frac{86400}{50} = 1728 \text{ s}$$

Tuto dobu můžeme brát jako nejmenší možnou dobu trvání simulace.

Pokud potřebujeme spouštět některý z prvků v daném čase je nutno přepočítat hodinový čas na simulační. Pro tento přepočet v celých hodinách byl sestaven Blok nastavení převodu času. V hlavním okně main je vlevo nahoře zadání proměnné, která nám nastavuje dobu simulace jednoho dne. Z této hodnoty pak tento blok vypočítá časové sepnutí po jednotlivých hodinách. Blok můžeme vidět na obrázku 17.



Obrázek 17 - Blok nastavení převodu času

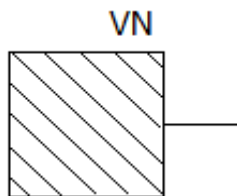
Jako výstupem jsou hodnoty proměnných  $h_0 - h_{24}$  jako čas v hodinách simulačního času 0-24h.

## 8.2 Modelování komponent

U modelování komponent se budeme snažit o co nejpřesnější přiblížení reálným parametrům s ohledem na složitost výpočtu. V modelu budou zahrnuty dynamické změny. Ty budou níže popsány a budou parametrizovatelné. Zároveň model musí být vytvořen tak, aby nebyla narušena jeho stabilita.

### 8.2.1 Zdroj 22kV

Zdroj VN je řešen třífázově, jedná se o náhradu sekundární strany transformátoru 110/22 kV. Schematickou značku tohoto prvku můžeme vidět na obrázku 18. Jako parametrizovatelnou veličinu zde uvádíme sdruženou hodnotu napětí v kV.



Obrázek 18 - Schematická značka Zdroje VN

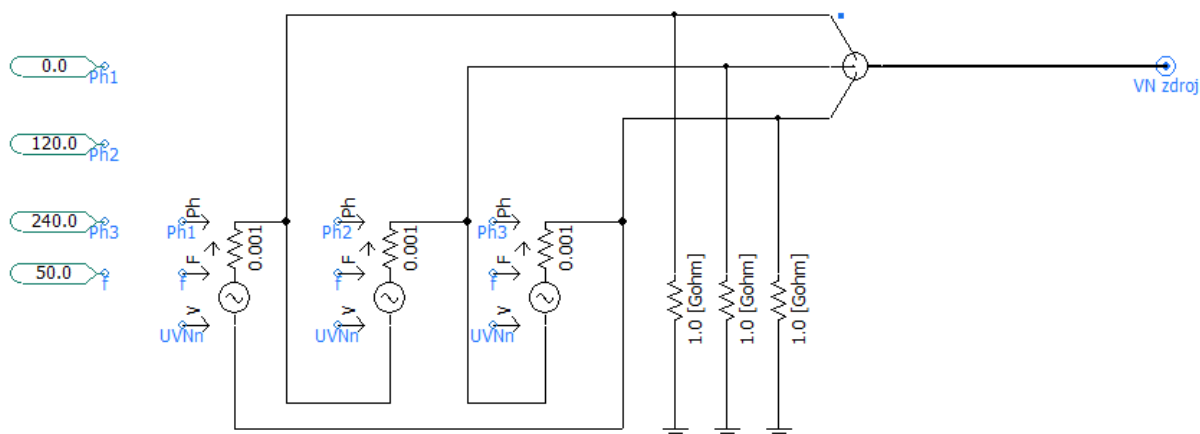
Vnitřní schéma zapojení tohoto prvku můžeme rozdělit do dvou částí, zdrojovou část a část která se zabývá změnou profilu napětí.



### 8.2.1.1 Zdrojová část

Tato část zdroje je vytvořena parametrizovatelnými zdroji, které byly vybrány z komponent dostupných v knihovně simulačního programu. Na vstup je přivedena velikost sdruženého napětí, fázový posuv zdrojů. Výstupy tohoto zdroje jsou spojeny se zemí odporem o hodnotě 1 Gohm, z důvodu zajištění možnosti měření napětí oproti fiktivní zemi. Zapojení této části můžeme vidět na obrázku

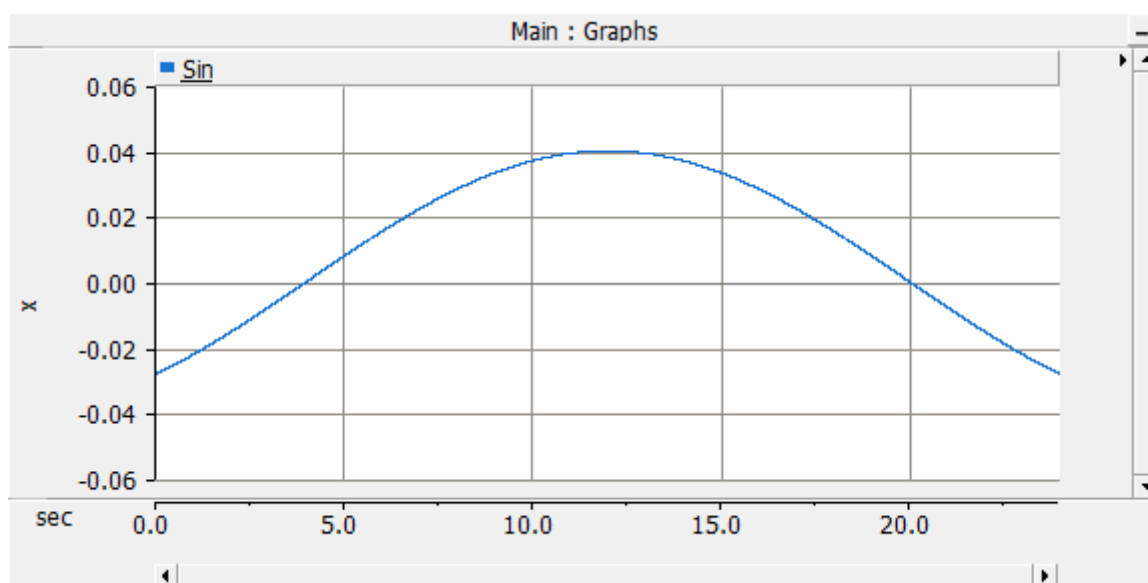
19.



Obrázek 19 - Zdrojová část VN

### 8.2.1.2 Nastavení profilu napětí

Principiálně funguje tak, že hodnotu zadanou manuálně do okna pro editaci parametrů vynásobíme koeficientem. První volbou je ta, že se velikost napětí nemění. Koeficient druhé volby, tedy proměnné hodnoty se skládá ze dvou částí. První část nám simuluje průběh poklesu napětí v závislosti na denní době. Ta je dána částí sinusovky, která začíná v úhlu  $315^\circ$  Maximum výkyvu je nastaveno 4%. Frekvenci jsme nastavili na 0,00434 Hz. Postup výpočtu frekvence popisují následující výpočty. Výsledný průběh je na obrázku 20.



Obrázek 20 - Průběh profilu Sin

Jedná se o  $\frac{3}{4}$  signálu sinus tedy:

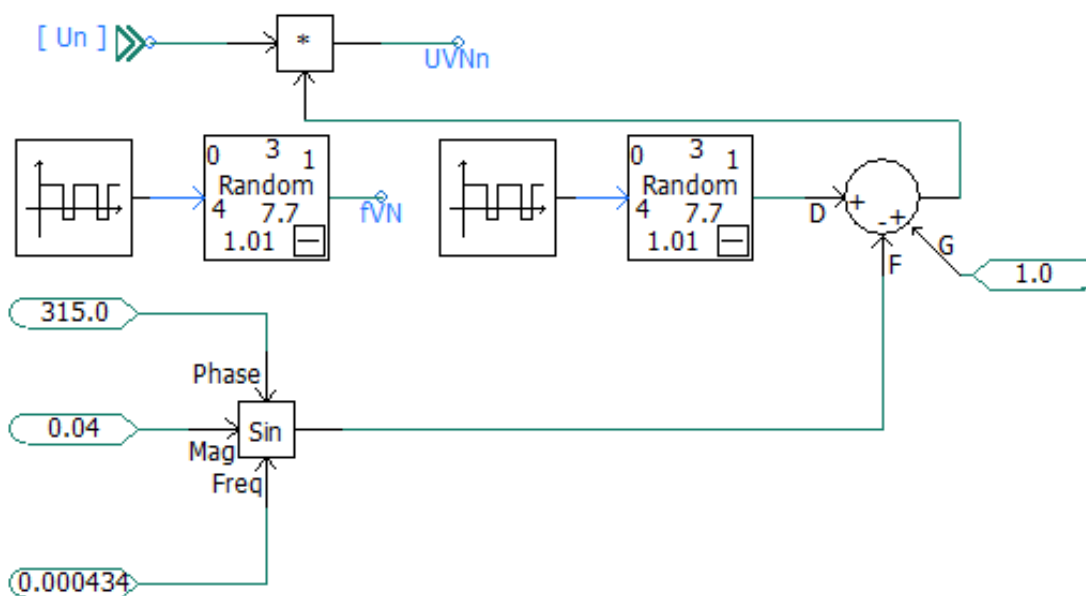
Výpočet času celé periody sin provedeme dle vzorce 8.2:

$$T_{sin} = \frac{t_{komprimovaná}}{0,75} \cdot 1 = 2304 \text{ s} \quad (8.2)$$

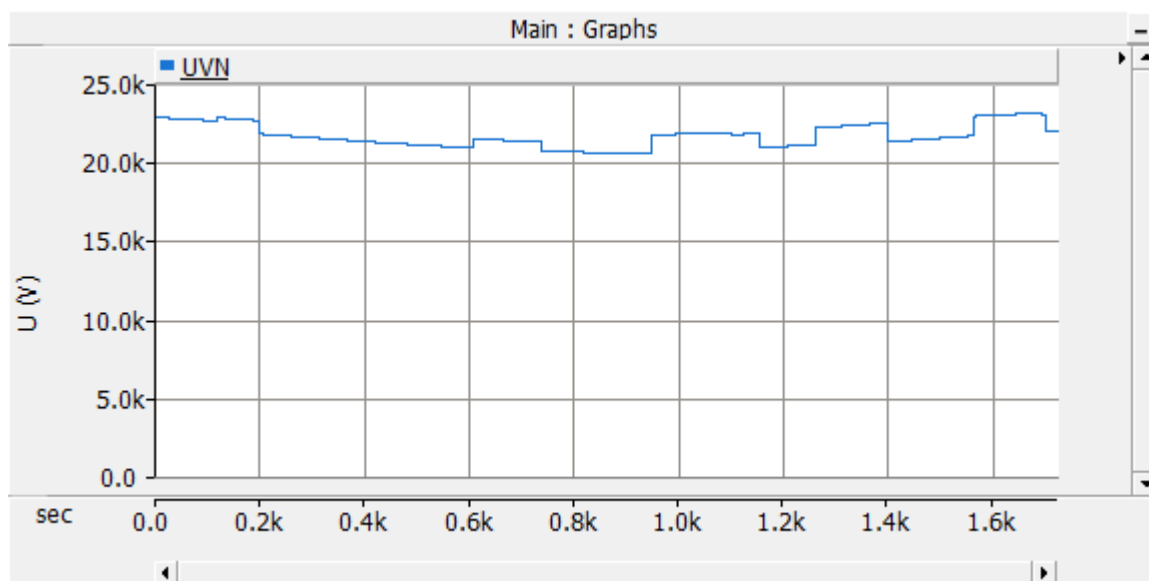
$$f_{sin} = \frac{1}{T_{sin}} = \frac{1}{2304} = 0,000434 \text{ Hz}$$

Tento signál jsme odečetli od signálu skokové změny, která simuluje skokové spínání např. zátěží nebo změnu odboček transformátoru VVN/VN. Tuto změnu jsme namodelovali pomocí náhodného obdélníkového průběhu s náhodnou změnou amplitudy.

Celé schéma obvodu pro nastavení profilu napětí můžeme vidět na obrázku č. 21. Celý průběh napětí zdroje VN během dne v za simulační dobu 1728 s uvažováním změny můžeme vidět z obrázku 22.



Obrázek 21 - Schéma zapojení obvodu řízení profilu napětí VN



Obrázek 22-Celkový profil napětí během dne

### 8.2.2 Vedení

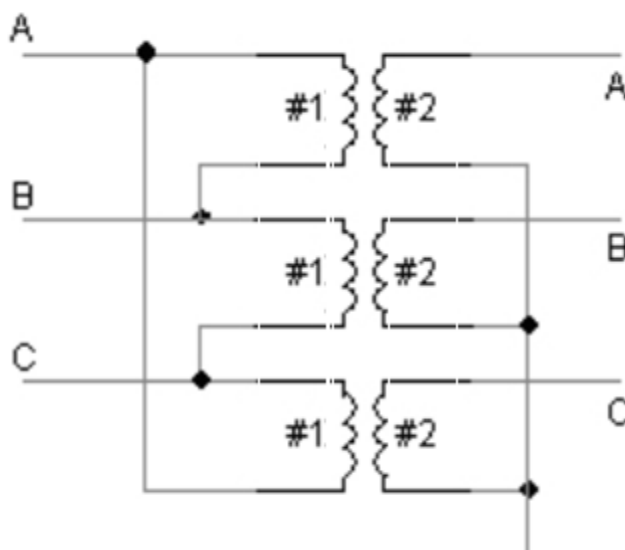
Vedení jsme modelovali jako podélnou impedanci. Pro model jsme vybrali jedno venkovní vedení VN. Pro síť NN jsme namodelovali jedno venkovní a jedno kabelové vedení. Dle distributora E.on se používají v sítích NN na kabelová vedení kabely typu NAYY [19]. Pro venkovní vedení NN jsme vybrali lano AlFe 70/11. Jeho parametry byly získány ze stránek firmy NKT a vědeckého článku IEEE [29][30]. Parametry vedení a kabelu můžeme vidět v tabulce 7.

Tabulka 7- Parametry použitých vedení a kabelu

Napěťová hladina	Typ	Xk [ohm/km]	Lk [mH/km]
VN	AlFe 120/22	0,266	1,276
NN	NAYY 150 mm <sup>2</sup>	0,206	0,201
NN	AlFe 70/11	0,474	0,95496

### 8.2.3 Transformátor

Pro simulaci transformátoru nám bude dostačovat 3-f transformátor z knihovny PSCAD. Je plně parametrizovatelný a umožňuje nastavení přepínání odboček primárního, nebo sekundární vinutí. Pro simulaci nám bude stačit klasický model transformátoru, který je modelován jako 3 jednofázové dvouvinutíové jednotky. Uživatel si může volit propojení vnutí do trojúhelníku D nebo do hvězdy Y.



Obrázek 23 - Schéma vnitřního zapojení transformátoru

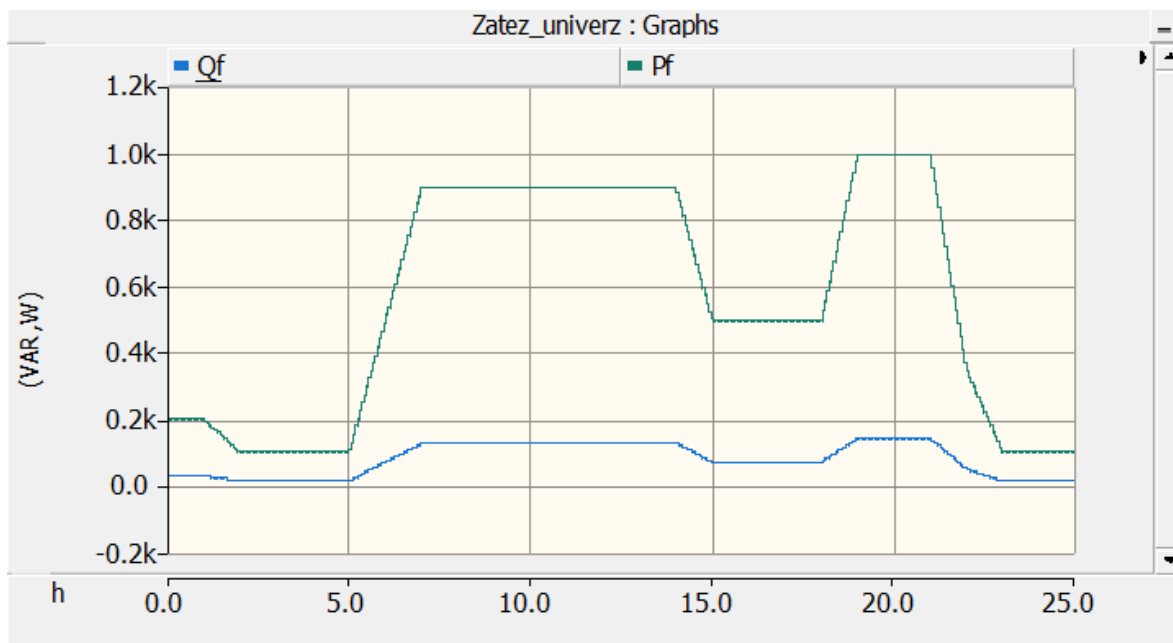
Velikost bude mít 250 kVA a převod standardně 22/0,4 kV. V modelu nastavíme vstup pro vstup pro přepínač odboček na primární vinutí. Nastavili jsme ho podle katalogových údajů, kde pro typ TNOSCT 250 kVA má parametry  $P_{0\max} = 300 \text{ W}$ ,  $P_{k\max} = 3250 \text{ W}$  a  $u_k = 4 \%$ . Hodnoty jsme přepočítali na poměrné a zadali do parametrizačního okna transformátoru viz. tabulka 8.

Tabulka 8 - Nastavené parametry modelu transformátoru

Transformer Name	T1
3 Phase Transformer MVA	0.25 [MVA]
Base operation frequency	50.0 [Hz]
Winding #1 Type	Delta
Winding #2 Type	Y
Delta Lags or Leads Y	Lags
Positive sequence leakage reactance	<b>0.04 [pu]</b>
Ideal Transformer Model	Yes
Eddy current losses	<b>0.0012 [pu]</b>
Copper losses	<b>0.013 [pu]</b>
Tap changer on winding	#1

## 8.2.4 Odběrné místo

Odběrné místo bude charakterizovat zátěž proměnná v čase. Bude do jisté míry parametrizovatelná. Je možné zadat nesymetrii zátěže, přidat další zdroj atd. Zátěž je navržena na simulaci intervalu 24h za simulační čas 1728 s. Simulační čas jednoho dne se musí vždy zadat v hlavním oknu simulace. Nastavení průběhu zátěže je takové, že se zadává maximální zdánlivý výkon, jeho účinník a charakter zátěže. To tvoří základní průběh spotřeby. Tento výkon je násoben koeficienty využití výkonu dle denní doby. Změna úrovně zatížení je doplněna rampami. Průběhy změny zatížení můžeme vidět na obrázku 24.



Obrázek 24 - Celkový průběh  $P$  a  $Q$  během dne při nastavení výkonu  $S_{\max} = 1000 \text{ VA}$

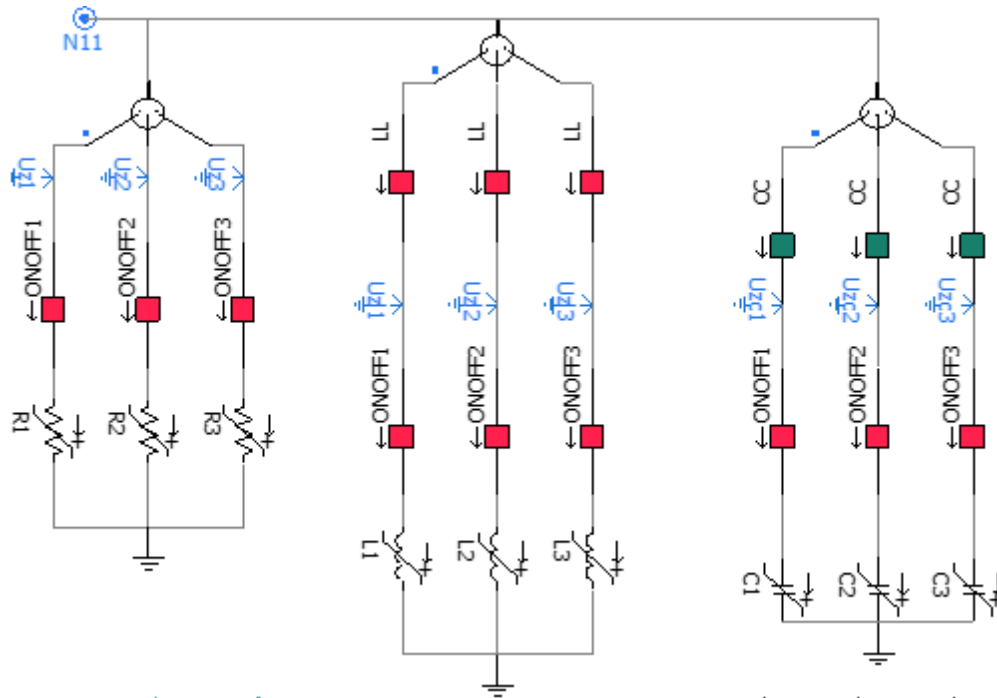
Koeficienty můžeme odečíst i z grafu. Zadaná hodnota výkonu na jednu fázi byla 1kW s účinníkem 0,99 induktivního charakteru. Pro úplnost si je uvedeme v tabulce 9.

Tabulka 9- koeficienty pro nastavení výkonu

Časový úsek [h]	0-1	2-5	7-14	15-18	19-21	23-24
Koeficient	0,2	0,1	0,9	0,5	1	0,1

Přechody mezi těmito časovými úseky jsou vyhlazeny rampami.

Schéma zátěže s řazením ovladatelných prvků rezistivit, kapacit a indukčností můžeme vidět na obrázku 25.



Obrázek 25 - Schéma řazení parametrizovatelných prvků zátěže

Tento blok má dvě okna s možnostmi zadání naší parametrizace, které si nebudeme dopodrobna specifikovat a budou k nahlédnutí v příloze. Jako výstup parametrizace je vždy hodnota odporu, indukčnosti nebo kapacity, která je v závislosti na vstupech regulována k docílení daného profilu odběru. Níže budou popsány funkce parametrizačních možností.

Výpočty probíhají jednoduše podle elementárních zákonů elektrotechniky

Výpočet činného a jalového výkonu dle vzorců 8.3:

$$P_{max} = S_{max} \cdot \cos\varphi (W; VA, -) \quad (8.3)$$

$$Q_{max} = S_{max} \cdot \sin\varphi (VAR; VA, -)$$

Pro výpočet rezistance využijeme vzorce 8.4:

$$I = \frac{U}{R} \quad (A; V, \Omega) \quad (8.4)$$

$$P = U \cdot I \quad (W; V, A)$$

Pak dosazením do vzorce 8.5:

$$(8.5)$$

$$P = \frac{U^2}{R} (W; V, \Omega)$$

A vyjádřením  $R$  dostaneme vzorec 8.6:

$$R = \frac{U^2}{P} (\Omega; V, W) \quad (8.6)$$

Pro výpočet indukčnosti  $L$  pro výpočet z jalového výkonu vycházíme ze znalosti, že  $X_L = \omega L$  pak bude platit vzorec 8.7:

$$L = \frac{U^2}{Q \cdot \omega} (H; V, V_{Ar}, \text{rad/s}) \quad (8.7)$$

Analogicky pak kapacitu za předpokladu že  $X_C = \frac{1}{C \cdot \omega}$  dostaneme vzorec 8.8:

$$C = \frac{Q}{U^2 \cdot \omega} (F; V_{Ar}, V, \text{rad/s}) \quad (8.8)$$

#### 8.2.4.1 Hlavní okno

Toto podokno obsahuje následující položky – tabulka:

Tabulka 10 - Parametrizační okno zátěže

Zdánlivý fázový výkon	1000
Typ zátěže	Kapacitní
Ucinnik	0.99
Pripojena zátěž?	ON
Faze 1 ON?	ON
Faze 2 ON?	ON
Faze 3 ON?	ON
Nesymetrie 1f	0
Nesymetrie 2f	0
Nesymetrie 3f	0

#### Zdánlivý fázový výkon zátěže

Zde se zadává výkon zadává ve VA. Udává výkon, který bude za normálních okolností odebírat každá fáze odběru. Jedná se o základní nastavení velikosti výkonu, který jsme si popsali výše a jeho průběh můžeme vidět na obrázku 24.

**Typ zátěže**

V tomto podokně zadáváme charakter zátěže. Toto podokno je volené jako výběrové okno. Na výběr máme ze dvou variant, tedy kapacitní a induktivní charakter. Tento blok nám zapíná a vypíná spínače CC a LL, které vedou k induktivním a kapacitním větvím.

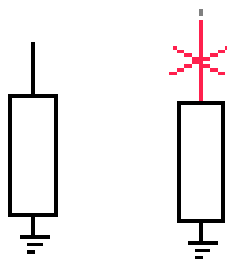
**Účinník**

V tomto výběrovém okně zadáváme velikost účinníku v rozmezí 0,0000001 – 0,9999999.

Tyto desetinné hodnoty jsou voleny pro zjednodušení výpočtů.

**Připojená zátěž?**

Toto podokno má funkci rychlého odpojení zátěže, pokud v daném scénáři zátěž nepotřebujeme. Má volby ON/OFF. Má i grafický výstup, který můžeme vidět na obrázku 26.



Obrázek 26 – Schématická značka zátěže ON a OFF

**Fáze 1,2,3 ON?**

V těchto třech polích se dá nastavit, které fáze budou aktivní. Pokud budeme uvažovat jednofázový odběr, zbylé dvě fáze vypneme.

**Nesymetrie**

Zde nastavujeme danou nesymetrii fáze v procentech. Pokud bude mít daná fáze vyšší odběr než je zadán používáme procenta v kladné hodnotě, pakliže menší použijeme znaménko mínus.

**8.2.4.2 Okno spínaných zátěží**

Tento model zátěže umožňuje superponování na hlavní průběh zátěže činný výkon procházející rezistancemi. Tato funkce nám umožní simulovat například spínané prvky pomocí HDO nebo libovolnou činnou zátěž. Umožňuje nám určit až 3 časová období spínání a také jaká fáze bude zatížena. Nyní si popíšeme vlastnosti, funkce a možnosti parametrizace této zátěže. Toto okno můžeme vidět v tabulce 11.



Tabulka 11- Parametrizační okno spínaných zátěží

Velikost spínané zátěže Pf	2000
frekvence spínání zátěže	0
pocet useku	1 usek
hodina sepnutí NT1	1
hodina vypnutí NT1	18
hodina sepnutí NT2	5
hodina vypnutí NT2	20
hodina sepnutí NT3	8
hodina vypnutí NT3	24
Faze 1	OFF
Faze 2	OFF
Faze 3	OFF

**Velikost spínané zátěže Pf**

Zde zadáváme velikost fázového odběru časově závislých úseků ve wattech. Fázový odběr je dán pro všechny časové úseky stejný. Má nám představovat jednu spínanou odporovou zátěž.

**Frekvence spínání zátěže**

Zde můžeme zvolit možnost, aby se zátěž střídavě vypínala a zapínala. Doba trvání stavu připojeno a odpojeno se rovná. Do pole této možnosti se zadává kolikrát do hodiny je požadován proces zopakovat.

**Počet úseků**

Zde zadáme počet časových úseků. Zadáním tohoto okna se aktivuje nebo deaktivuje následujících 6 oken kde volíme čas spínání a vypnutí.

**Hodina sepnutí a hodina vypnutí**

Zde můžeme nastavit časy vypnutí a zapnutí. Pokud se časy budou překrývat, zátěž nasuperponuje výkony podle počtu překrytí. Může se tato funkce použít, pokud chceme simulovat kaskádově spínané zátěže. Blok je konstruován tak, že můžeme zadat pouze čas sepnutí v celých hodinách.

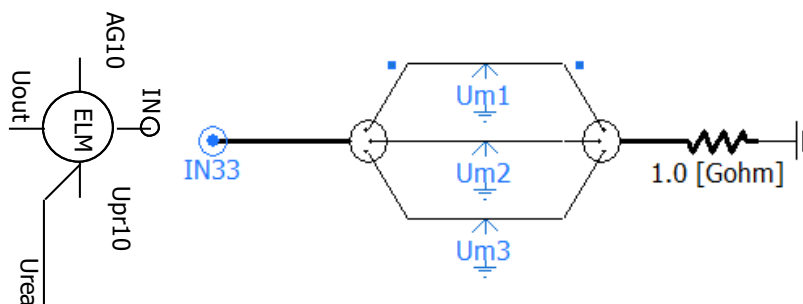
**Fáze 1,2,3**

Zde vybíráme, do které fáze bude daná spínaná zátěž pracovat. Opět platí že máme zadané fázové hodnoty výkonů.

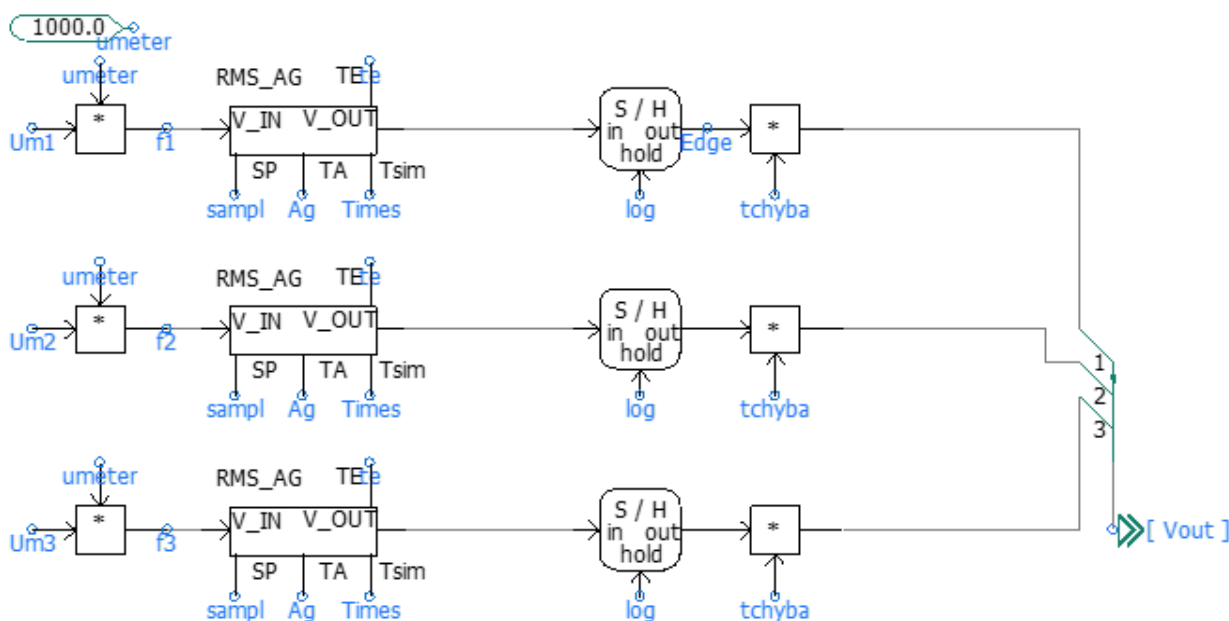
**8.2.5 Měření odběrného místa**

Zde simulujeme měření napětí elektroměrem. Musíme zde dodržet vlastní princip měření elektroměru, kde dochází k měření a posílání výstupní veličiny v určitém agregačním intervalu. Zde chceme, aby komponenta byla parametrizovatelná a agregační interval se dal volit manuálně. Pro naše použití se nám nehodila komponenta single phase RMS meter, která vypočítá RMS hodnotu pro každý jeden interval z nového množství samplů, takže se vzorky překrývají. Z tohoto důvodu

jsme si naprogramovali vlastní komponentu, která nám zpracovala signál napětí na požadovanou výstupní hodnotu, která nám koreluje s měřením napětí. Schématickou značku můžeme vidět na obrázku a vnitřní zapojení pak můžeme vidět na obrázku 27.



Obrázek 27 - Schématická značka (vpravo) a schéma vstupního obvodu měření (vlevo)



Obrázek 28 – Hlavní obvod měření

Komponenta má analogový 3f vstup. Má 3 sondy napětí, ze kterých bereme signál pro naprogramovaný blok který jsme si pojmenovali RMS\_AG. Vstupní obvod je pro úplnost uzemněn přes odpor 1 Gohm. Obvod, který si popíšeme níže, má na výstupu již hodnoty agregovaných RMS hodnot. Dále má výstup, který nám vždy agreguje hodnoty 10 min. To je z důvodu dat pro normu EN 50610 a následné posouzení velikosti napětí v normách je tato agregovaná hodnota směrodatná. Další výstup je obvod, který měří po kolik procent času jsou hodnoty v normě  $\pm 10\%$ . Tento modul je také doplněn o obvody, které nám simulují časové zpoždění a chybu měření. Jejich výstupy obsluhují komponenty S/H a násobičku. Schéma zapojení hlavního výstupního obvodu měření vidíme na obrázku 28.

### 8.2.5.1 RMS AG

Tento obvod je naprogramován v jazyce FORTRAN. Zde si popíšeme jak jsou definovány vstupy, výstupy a vlastní skript. Celý blok, jeho parametrizaci, můžeme vidět na obrázku 29.



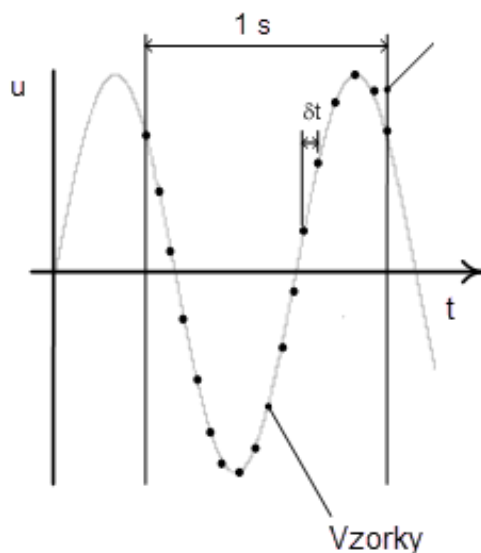
Obrázek 29 - Schématická značka a parametrizační okno modulu RMS\_AG

V prvním bloku zadáváme počet samplů na sinusovku, tedy na jednu periodu. Tento blok používá měřicí okno 1 s. V normálním případě při frekvenci 50 Hz by počet samplů byl na 50x vyšší.

V bloku Agregací čas se zadává agregační interval a to 1, 2, 5, 10, 15min.

V dalším řádku zadáváme typ výpočtů, a to z důvodu různých typů výpočtů elektroměrů. Fyzikálně správně je výpočet kvadratickým průměrem, avšak mnoho výrobců dodává elektroměry se výpočtem agregační hodnoty aritmetickým průměrem. Princip výpočtů si ukážeme níže.

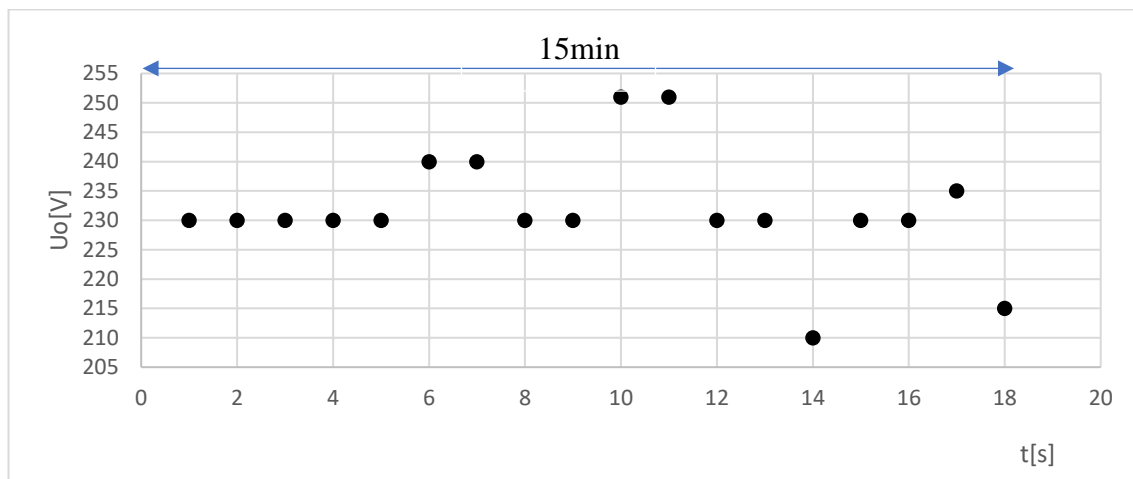
Jak je uvedeno na začátku celý model obsahuje kompresi 1:50. Na níže uvedeném grafu můžeme vidět 1 s času po kompresi. Frekvence se z 50 Hz snížila na 1 Hz. Tedy za 1 s proběhne pouze 1 celý sinusový průběh. Ten navzorkujeme uživatelsky zadaným počtem vzorků. Kvadratickým průměrem pak vypočítáme efektivní hodnotu napětí 1s okna viz. vzorec 8.9. Princip samplování můžeme vidět na obrázku 30.



Obrázek 30 – Samplování sinusového signálu

$$U_{\text{okno1s}} = \sqrt{\frac{1}{n_o} \sum u_{oi}^2 (V; -, V,)} \quad (8.9)$$

Nyní máme 1sec efektivní hodnoty. Ze souboru těchto hodnot chceme dostat agregovanou hodnotu za daný čas. Čas je opět uživatelsky zadavatelný. Pro příklad si ukážeme výpočet agregované hodnoty pro 15 min interval. Jelikož máme kompresi času, úsek pro 15 min bude trvat 18 s. Z grafu na obrázku 31 můžeme vidět hodnoty 1s oken. Z nich vypočítáme, v závislosti na způsobu výpočtu, hodnotu agregovanou.



Obrázek 31 - Příklad vstupních hodnot pro výpočet agregované hodnoty

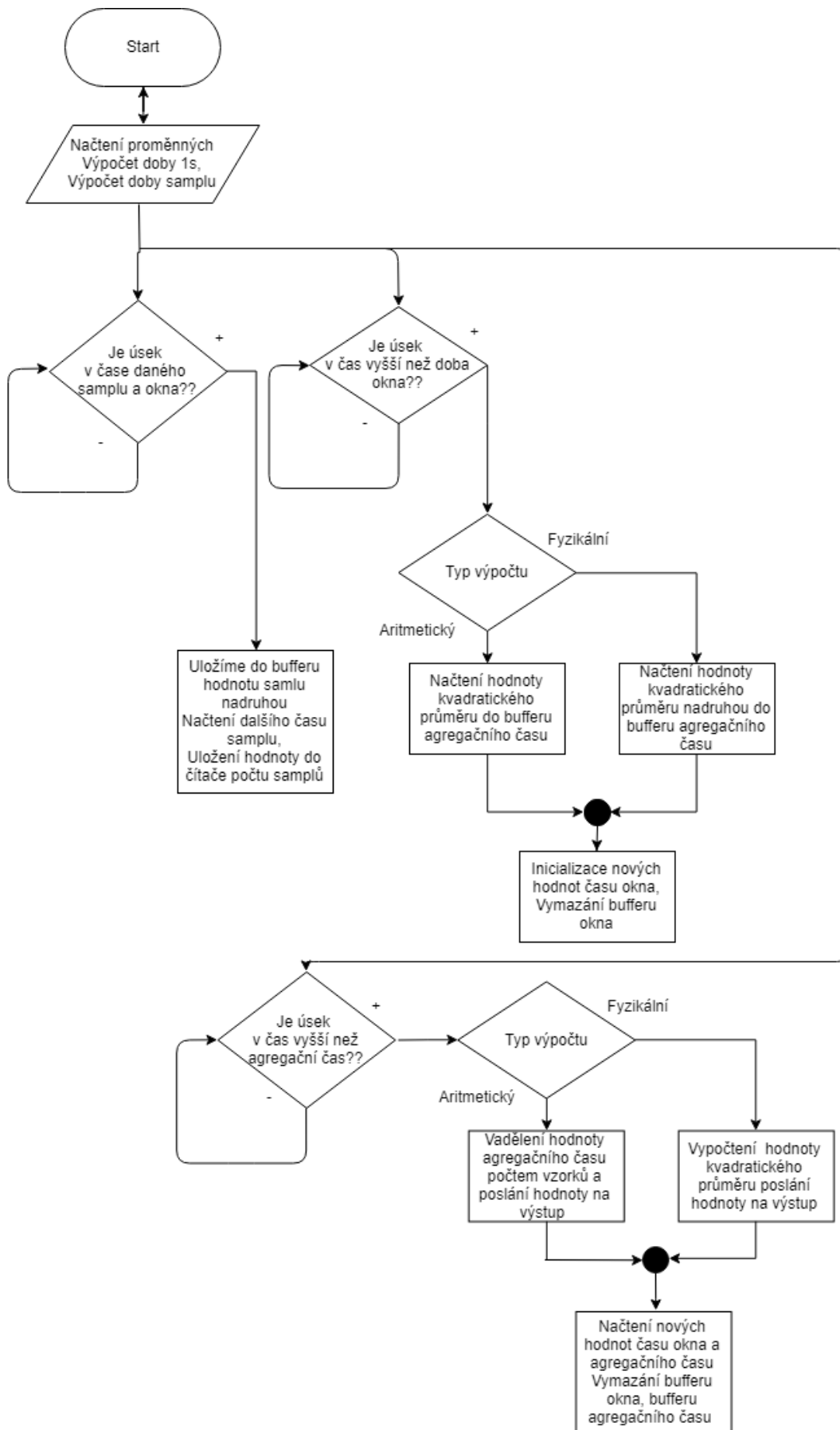
Pro hodnoty vypočítané aritmetickým průměrem bude použit vzorec 8.10:

$$U_{ag15} = \frac{\sum u_{okno1si}}{n_{15}} (V; V; -) \quad (8.10)$$

Pro výpočet agregované hodnoty kvadratickým průměrem použijeme vzorec 8.11:

$$U_{ag15} = \sqrt{\frac{1}{n_{15}} \sum u_{okno1si}^2} (V; -; V) \quad (8.11)$$

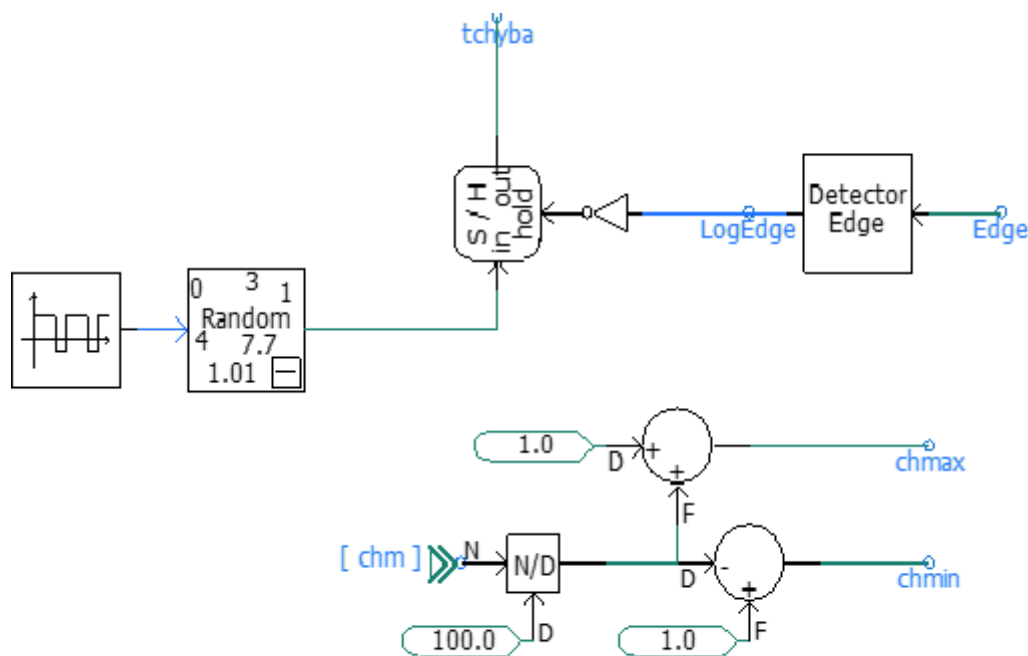
Na obrázku 32 můžeme vidět vývojový diagram, kde je popsáno, jak funguje vlastní skript modulu Ag meter, který dokáže získávat agregované hodnoty za námi zvolený interval.



Obrázek 32- Principiální algoritmus pro získání agregované hodnoty

### 8.2.5.2 Časové zpoždění a chyba měření

Chyba měření se zadává v podokně chybovost a zadáváme zde procentní velikost chyby. Tato hodnota nám dává maximální hodnotu chyby  $\pm$ . Výsledná hodnota může chyby může být kladná i záporná. Velikost je náhodně generována za časový úsek cca 15 min. Obvod pro generování chyby vidíme na obrázku 33. Vstupem chyby měření je proměnná chm. Chyba měření se aktualizuje až po odeznění předchozí agregované hodnoty.



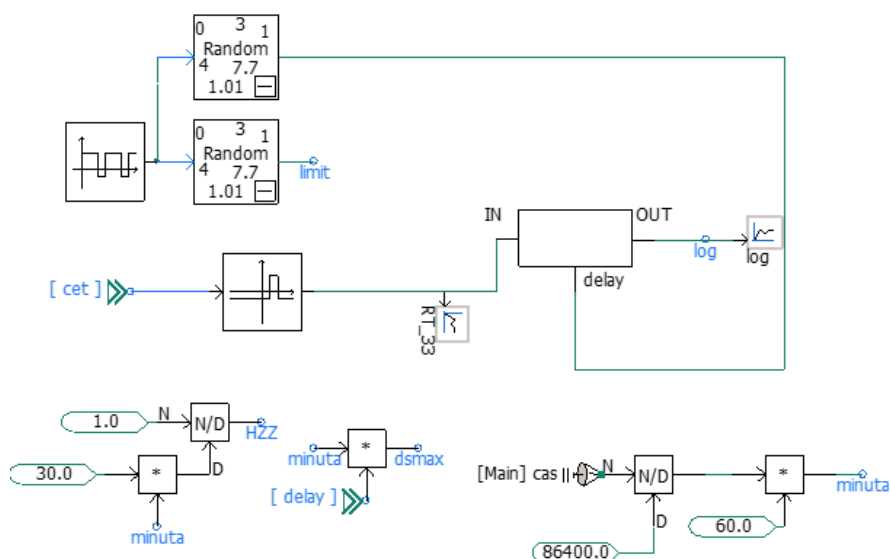
Obrázek 33- Schéma nastavení chyby měření

Časové zpoždění se udává ve dvou hodnotách, Jako první vybíráme maximální délku zpoždění v intervalech od 0-10 min do 0-24 h. Zpoždění se generuje každou čtvrt hodinu funkcí random v daném rozsahu. To je následně zpracováno a výstupní hodnota v simulačním čase jako delay. Dále vybíráme četnost, která se zadává jako přibližný pravděpodobnostní poměr. Zadáváme hodnoty od žádného zpoždění až po pravděpodobnost 1:2. Hodnoty četností vidíme v tabulce 12.

Tabulka 12 - Proměnné četnosti zpoždění

četnost [-]	0	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:10	1:20	1:30	1:60
Koeficient	0	30	20	155	12	10	6	3	2	1

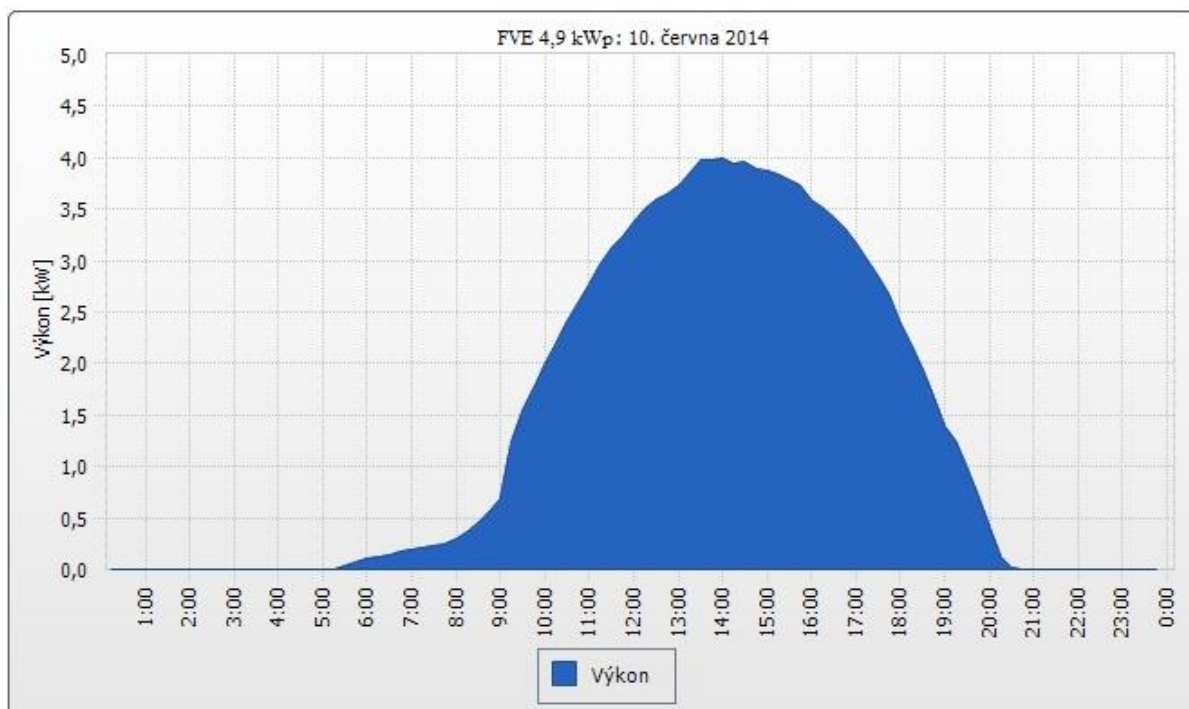
Opět se pracuje s funkcí random dostupnou v knihovně PSCAD. Ta generuje každou simulační čtvrt hodinu hodnoty 0,1-59, což je proměnná limit. Ta se pak porovnává s proměnnou četností. Pokud je proměnná četnost vyšší, než vygenerovaný limit pošle impuls do obvodu Holdtime a ten drží signál v úrovni 1 na výstupu tak dlouho jaká byl v době impulsu doba zpoždění delay. Schéma zapojení můžeme vidět na obrázku 34.



Obrázek 34 - Obvod pro výpočet a nastavení zpoždění

### 8.2.6 FVE

Pro modely FVE jsme použili proudové zdroje dostupné v knihovně PSCAD. Model injektuje do sítě pouze činný výkon. Jsou k dispozici dva modely: První reprezentuje vyvedení výkonu třífázově, kdežto druhý nám symbolizuje FVE, která dodává pouze do jedné fáze. Model má za úkol injektovat výkon v průběhu, který se co nejreálněji blíží skutečnému. Z obrázku č. 35 můžeme vidět, že průběh se blíží pulsusoidě. Atmosférické podmínky jsou ideální, pokud sluneční záření neprochází přes oblačnost. Při oblačných dnech podle hustoty oblačnosti klesá výroba FVE přibližně na polovinu, v horších případech o 90% maximálních hodnot [10].



Obrázek 35 - Průběh výroby FVE (upraveno autorem) [9]

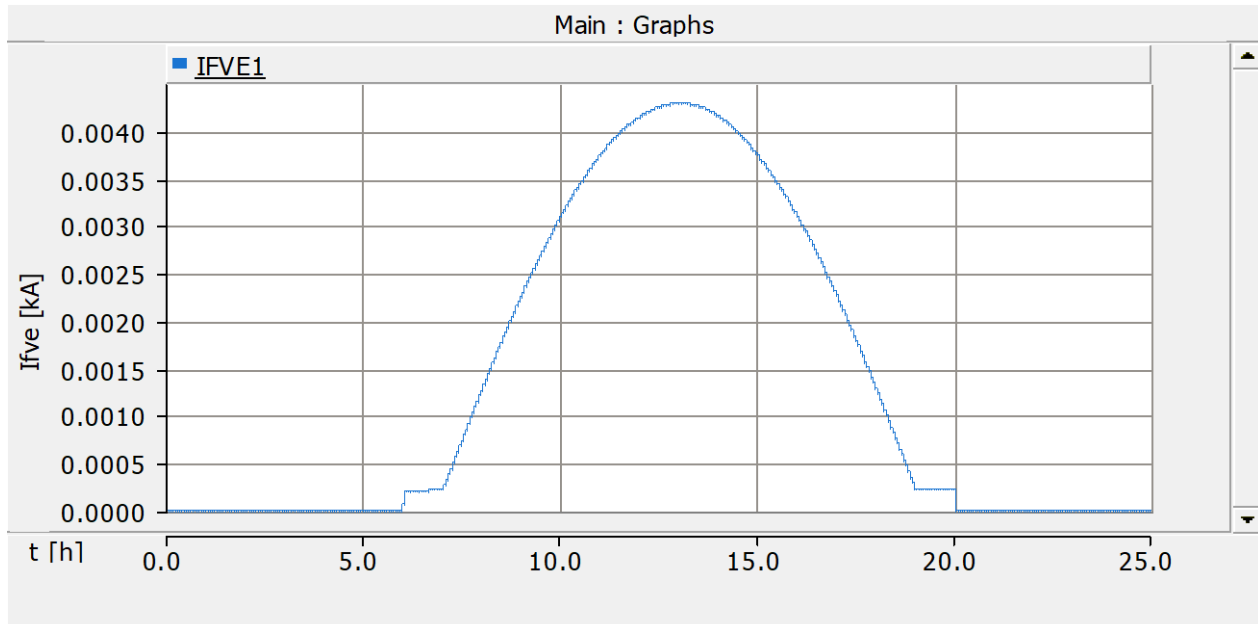
Základní průběh se dá popsat následovně dle 8.12 :

$$P_{FVE} = \begin{cases} 0 \cdot P_{FVE_{max}} & \text{if } t < h6 \\ 0,05 \cdot P_{FVE_{max}} & \text{if } h6 < t \leq h7 \\ 0,05 \cdot P_{FVE_{max}} + 0,95 \cdot P_{FVE_{max}} \cdot \sin(x) & \text{if } h7 < t \leq h19 \\ 0,05 \cdot P_{FVE_{max}} & \text{if } h19 < t \leq h20 \\ 0 \cdot P_{FVE_{max}} & \text{if } h20 < t \end{cases} \quad (8.12)$$

Kde proměnná  $x$  nám dává rampu v úseku  $h7 - h19$ . V čase  $h7$  začíná rampa v 0 a končí hodnotou 180 v čase  $h19$ . Hodnoty jsou přivedeny na modul  $\sin$  který je obsažen v knihovně PS CAD a udává nám úhel ve stupních. Dá se popsat podle rovnice 8.13.

$$x = \begin{cases} 0 & \text{if } t \leq h7 \\ h7 = 0 \rightarrow \text{lineárně} \rightarrow h19 = 180 & \text{if } h7 < t \leq 19 \\ 180 & \text{if } t = h19 \\ 0 & \text{if } h19 < t \end{cases} \quad (8.13)$$

Tento průběh graficky můžeme vidět na obrázku 36.



Obrázek 36 - Ideální průběh FVE



### 8.2.6.1 Parametrizace modulu FVE

Nyní si popíšeme parametrizační okno prvku, které vidíme na obrázku 37:

Výkon FVE MAX	1000
Hustota oblačnosti	0
Doba oblačnosti	0
Fáze připojení	f1

Obrázek 37 - Parametrizační okno FVE 1f

#### Výkon FVE

Zde zadáváme maximální dodaný výkon  $P_{FVE\ MAX}$  při optimálních podmínkách na fázi ve wattech. Maximální výkon, jak můžeme vidět na obrázku 36, se nachází na vrcholu sinusoidy při optimálních podmínkách v čase 13:00.

#### Hustota oblačnosti

Při změně hustoty oblačnosti dochází vždy ke změně výkonu. V tomto modelu jsme se rozhodli pro skokovou změnu oblačnosti, jehož intenzita bude parametrizovatelná v 6ti stupních.

Měřítka zadaných hodnot můžeme vidět v tabulce 13 :

Tabulka 13 - Parametry nastavení hustoty oblačnosti

Hustota oblačnosti [-]	0	1	2	3	4	5
Výkon [%]	100	60	40	30	20	10

#### Doba oblačnosti

Zadat můžeme také rychlost střídání oblačnosti s danou hustotou. Zadáváme opět hodnoty 0-5. Kde hodnoty 1-4 pracují na určité míře náhodnosti oblačnosti. Odstupňování těchto hodnot můžeme vidět z tab. 14.

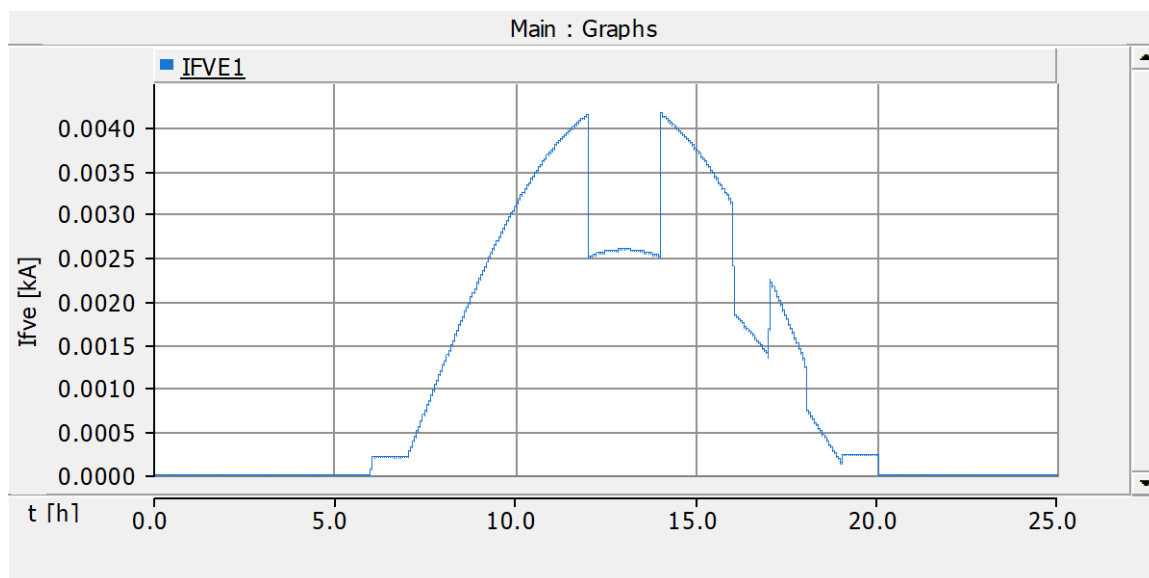
Tabulka 14 - Parametry nastavení doby oblačnosti

Doba oblačnosti [-]	0	1	2	3	4	5
Četnost [%]	0	1:5	2:5	3:5	4:5	100

#### Připojená fáze

Toto okno je aktivní pouze u jednofázové FVE. Můžeme si zde vybrat do které fáze chceme činný výkon injektovat.

Na obrázku 38 můžeme vidět závislost proudu dodaného do fáze 1, při nastavení hustoty oblačnosti 1 a doby oblačnosti 3.



Obrázek 38 - Výsledný průběh parametrizovatelné FVE

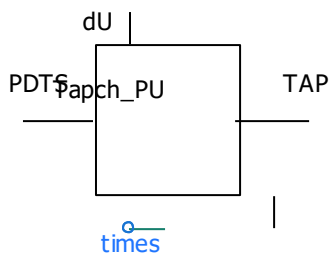
### 8.3 Regulátor přepínače odboček

Budeme uvažovat 2 modely řízení. V obou případech se bude jednat o ECOTAP VPD CONTRO PRO od firmy Reinhausen Maschienfabrik. Můžeme vybrat ze 3 možností řízení. První možností je rozhodování na základě hodnot měření přivedených na digitální vstupy regulátoru. Druhá možnost je nastavení provádění operací přepínání odboček na popud nadřazeného systému SCADA – externí řízení. Poslední možnost je kombinace těchto předešlých dvou možností. Rozhodovací mechanismy budou popsány v kapitolách níže.

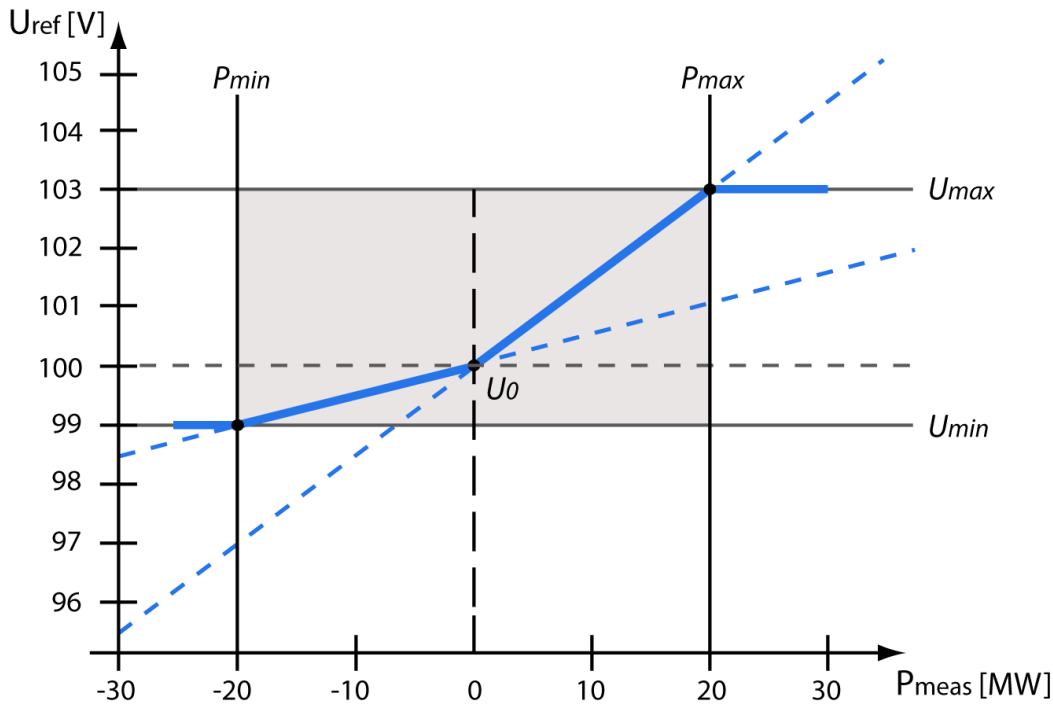
Regulátor bude mít 2 stupňovou regulaci. Bude mít pásmo pro rychlou a pomalou regulaci, ze kterých pomalá bude mít užší pásmo citlivosti. Minimální čas pro rychlou regulaci jsou 3 sekundy.

#### 8.3.1 P/U regulace OLTC

Tento způsob regulace je závislostí napětí na měřeném činném výkonu. Schématická značka je uveden na obrázku 39 a celý blok nese název Tapch\_PU. Umožňuje kompenzovat úbytek napětí během zvýšení zatížení v síti, nebo naopak zvýšení napětí kvůli dodávce elektrické energie z decentrálních zdrojů. Měřením získáme kladnou nebo zápornou hodnotu výkonů a na základě nich a hodnot zadaných uživatelských hodnot napětí dostaneme 2 řídicí lineární závislosti, které jsou zobrazeny v grafu na obrázku 40.



Obrázek 39 - Schématická značka Tapch\_PU



Obrázek 40 - Závislost činného výkonu na referenčním napětí [32]

Tabulka 15 - Popis parametrů z grafu na obrázku 40

$U_{ref}$	[V]	Referenční hodnota napětí pro rozhodování o přepnutí odbočky
$P_{meas}$	[W]	Měřená hodnota činného výkonu na sekundární straně DTS
$P_{min}$	[W]	Hodnota činného výkonu, při které je minimální hodnota referenčního napětí (odběr)
$P_{max}$	[W]	Hodnota činného výkonu, při které je maximální hodnota referenčního napětí (dodávka z DS)
$U_{min}$	[V]	Nastavená velikost napětí $U_{ref}$ při $P_{min}$
$U_{max}$	[V]	Nastavená velikost napětí $U_{ref}$ při $P_{max}$
$U_0$	[V]	Nastavená hodnota napětí při stavu $P_{max} = P_{min}$

Hodnoty referenčního napětí se tedy budou nastavovat dle výše uvedené uživatelsky zadané závislosti. Algoritmus vybrání hodnoty reference se dá popsat dle 8.14:

$$U_{ref} = f(P_{meas}) = \begin{cases} P_{meas} > P_{max}, & U_{ref} = U_{max} \\ P_{meas} < P_{min}, & U_{ref} = U_{min} \\ P_{meas} = 0 \text{ W}, & U_{ref} = U_0 \\ P_{min} \leq P_{meas} \leq 0, & U_{ref} = \left( \frac{U_0 - U_{min}}{0 - P_{min}} \right) \cdot P_{meas} + U_0 \\ 0 \leq P_{meas} \leq P_{max}, & U_{ref} = \left( \frac{U_{max} - U_0}{P_{min} - 0} \right) \cdot P_{meas} + U_0 \end{cases} \quad (8.14)$$

Pro správné nastavení přepínače odboček si musíme zvolit pásmo regulace, které když překročíme, tak přepínač odboček vybaví. Z důvodu správné regulace si musíme stanovit minimální regulační pásmo, pod které bychom neměli jít z důvodu prevence chybných přepnutí. To vypočítáme podle vzorce 8.15.

$$\pm B_{min} \geq 0,6 \cdot \frac{U_{tap\ n+1} - U_{tap\ n}}{U_n} \cdot 100 \text{ (}\%; V, V, V\text{)} \quad (8.15)$$

Při uvažování přepínače odboček s krokem 3% bude pro VN napětí transformátoru:

$$\pm B_{min} \geq 0,6 \cdot \frac{22660 - 22000}{22000} \cdot 100 \geq \pm 1,8\%$$

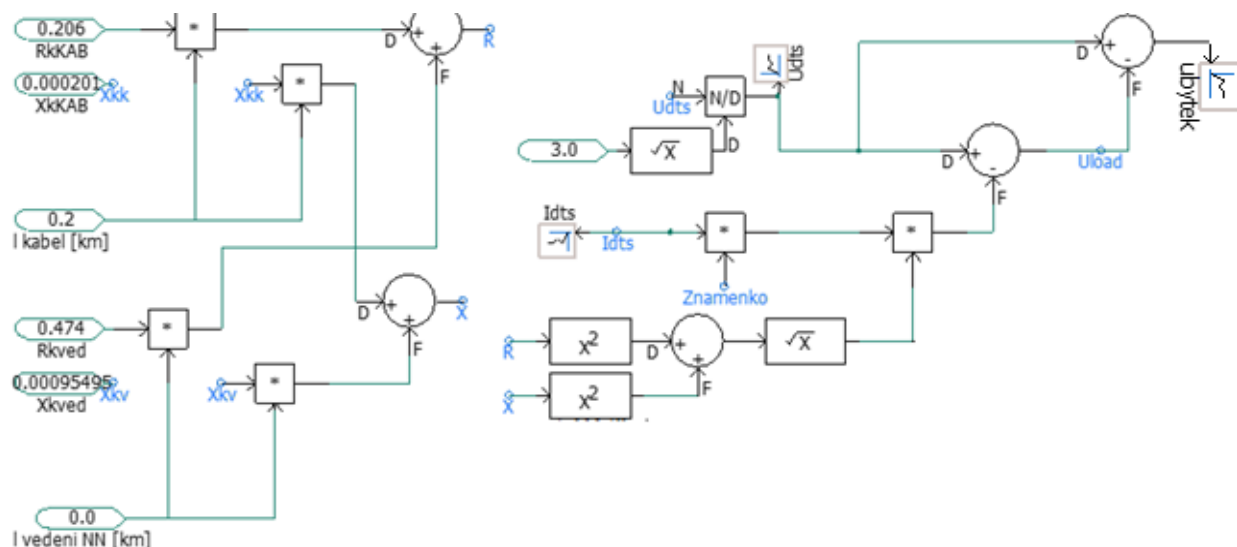
Minimální šířka necitlivosti pro transformátor s přepínáním odboček s krokem odbočky 3% je tedy 1,8%.

Pokud simulujeme rozlehlou síť s velkými napětovými úbytky, zařadíme do regulace i impedanční kompenzaci. Ta funguje na principu predikčního úbytku proudu v síti. Na základě parametrů kabelů a vedení odhadneme střední hodnotu impedance této sítě.

Následuje výpočet úbytku napětí na fiktivním místě za střední impedancí. Úbytek napětí vypočítáme následovně dle 8.16:

$$\pm U_{fikt} = U_{DTS} - \Delta U = U_{DTS} - \left( I \cdot \sqrt{R_{fikt}^2 + X_{fikt}^2} \right) (V; V, V, \quad V; \Omega, \Omega) \quad (8.16)$$

Na obrázku 40 vidíme schéma v PSCAD pro výpočet úbytku napětí.



Obrázek 41 - Schéma pro výpočet úbytku napětí

Kladná nebo záporná hodnota úbytku napětí závisí na směru toku energie. Pokud transformátor dodává výkon, bude hodnota záporná, a naopak pokud bude výroba převažovat, budeme uvažovat zvýšení napětí. .

Výsledné napětí, které budeme porovnávat pak bude dle vzorce 8.17:

$$U_{tap} = U_{ref} \pm U_{fikt}(V; V, V) \quad (8.17)$$

Máme tak vstupní referenční napětí, na které nyní můžeme aplikovat rozhodovací algoritmus.

Zde si uvedeme zjednodušený algoritmus viz. obrázek 41:



Obrázek 42- Zjednodušený algoritmus přepnutí odbočky pomocí tap\_PU

Pro vyšší složitost okomentovaný skript je umístěný v Příloze A

Parametrizační okno můžeme vidět na obrázku 42.

Tap step	0.03
Pásmo pomalé regulace	0.06
pásmo rychlé regulace	0.09
Cas T1- pomala reg	1800
Cas T2- rychla reg	3
Agregacni interval prvku	1
pocet odbocek	9
Pmax	5000
Pmin	-100000
Umax	250
Umin	215
U0	230
Uf	230

Obrázek 43-Parametrizační okno modulu tapch\_PU

Tap step

Zde zadáváme velikost odbočky transformátoru v poměrných jednotkách.

Pásmo pomalé regulace

V tomto okně zadáváme velikost pásma, pro které při překročení bude delší čas rozhodování T1. Měl by zde být zadaný menší rozsah než u pásma rychlé regulace. Zadáváme v poměrných jednotkách.

Pásmo rychlé regulace

V tomto okně zadáváme velikost pásma, pro které při překročení bude kratší čas rozhodování T2, nejméně však 3s, z důvodu konstrukčních vlastností přepínače odboček Reinhausenn. Zadáváme v poměrných jednotkách.

Čas T1

Doba vybavení pomalé regulace v sekundách.

Čas T2

Doba vybavení rychlé regulace sekundách.

Agregační interval prvku

Toto okno není důležité pro tuto regulaci. Nastavíme zde pouze dobu sepnutí regulace, která je 1,5x větší, než je agregační čas.

Počet odboček

Zde zadáváme počet odboček transformátoru včetně nulté. Maximálně 9 minimálně 3 odbočky.

Uf

Jmenovitá hodnota fázového napětí proti zemi. Zadáváme ve Voltech. Na základě této hodnoty vypočítáme hranice limitních napětí.

Další parametry nastavení křivek byly popsány výše.

### 8.3.2 Regulace na základě měření na OPM

Zde si popíšeme modul přepínače odboček, který rozhoduje o změně odbočky na základě agregovaných hodnot napětí online. Na vstupu do regulátoru budou dvě hodnoty napětí. Jako vstupní hodnoty jsou vyselektované maximální hodnota napětí a minimální hodnota napětí z elektroměrů pomocí funkčních bloků max a min z knihovny psacad. Dalším vstupem je celkový čas simulace. Blok má své parametrizační okno, ve kterém se zadávají přímo parametry regulátoru přepínače odbočky. Vycházíme z parametrů přepínače odboček od firmy Reinhausen. Parametry jsou uvedeny v tabulce 16.

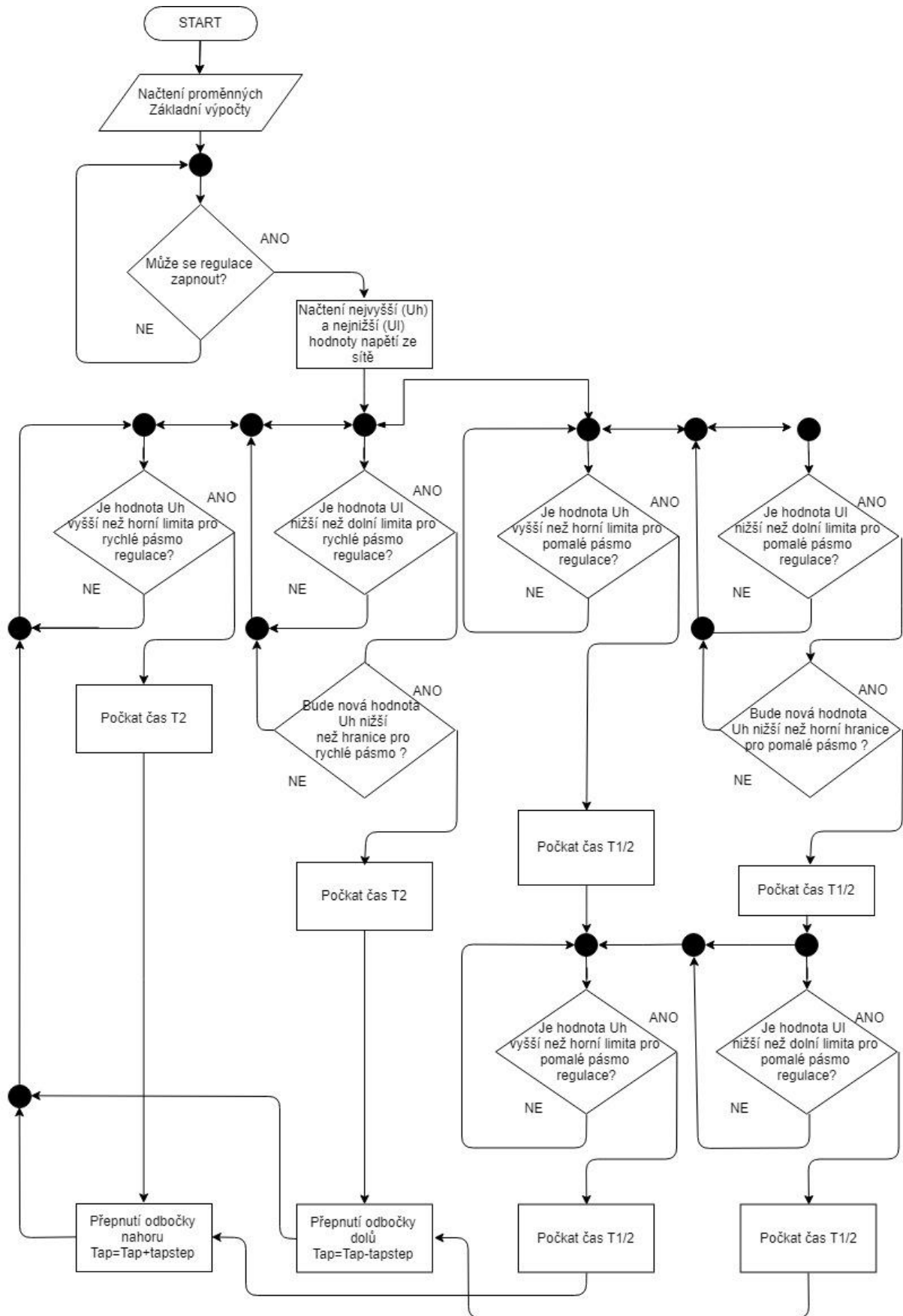
Tabulka 16 - Parametrizační tabulka nastavení Tapch\_online

Parametr	Jednotka	Doporučená velikost	Vlastnosti
Tap Step	p.j.	0,01 - 0,03	Teoreticky max. 0,0375
Počet odboček	-	3, 5, 7, 9	Maximálně 9 odboček
Referenční napětí	V	230	-
Pásmo pomalé regulace	p.j.	0,6	-
Pásmo rychlé regulace	p.j.	0,09	-
Čas rychlé regulace	s	3	Nejnižší doba mezi 2 sepnutími je 3 s
Čas pomalé regulace	s	1800	Minimálně 2x agregační čas
Agregační čas	min	1, 2, 5, 10, 15	Volíme podle nastavení elektroměru

Vycházíme z předpokladu, že je pro nás důležitější zabránit přepětím, před podpětím. Pokud bude situace taková, že nelze hodnoty uregulovat, Tapchanger zareaguje snížením hodnoty napětí a vyše alarmový signál. Parametrizační okno je na obrázku 44. Jeho hodnoty jsou totožné s modulem Tapch\_PU, které se nachází v části 8.3.1.. Zjednodušená rozhodovací logika Tapchangeru je zobrazena ve vývojovém diagramu na obrázku 45. Celý skript pro rozhodování Tapchangeru je uveden v příloze B.

Tap step	0.03
Referenční hodnota	230
Pásmo necitlivosti	0.06
pásmo rychlé regulace	0.09
Cas T1- pomala reg	1800
Cas T2- rychla reg	3
Agregacni interval prvku	10
pocetodbocek	3

Obrázek 44- Parametrizační okno Tapch\_online



Obrázek 45 - Zjednodušený vývojový diagram Tapch\_online

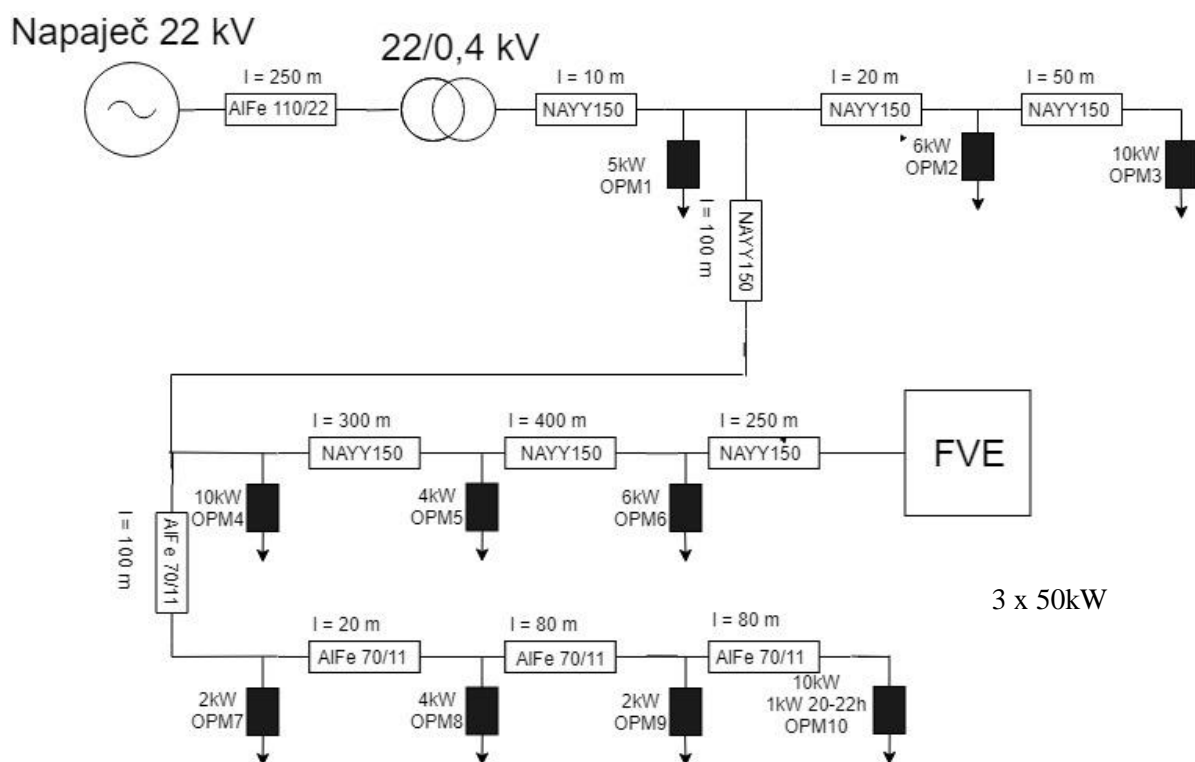


## 9 SIMULACE TESTOVACÍ SÍTĚ

Zde si sestavíme modely testovacích sítí pro konkrétní scénáře. Model je plně parametrizovatelný. Nastavíme tudíž vhodnou konfiguraci, kdy v síti bude probíhat dynamická změna napětí v závislosti na změnu zátěže a výroby FVE. Pro stejné nastavení budeme postupně testovat různé druhy regulace profilů napětí v síti s účelem udržet je v co nejlepších mezích.

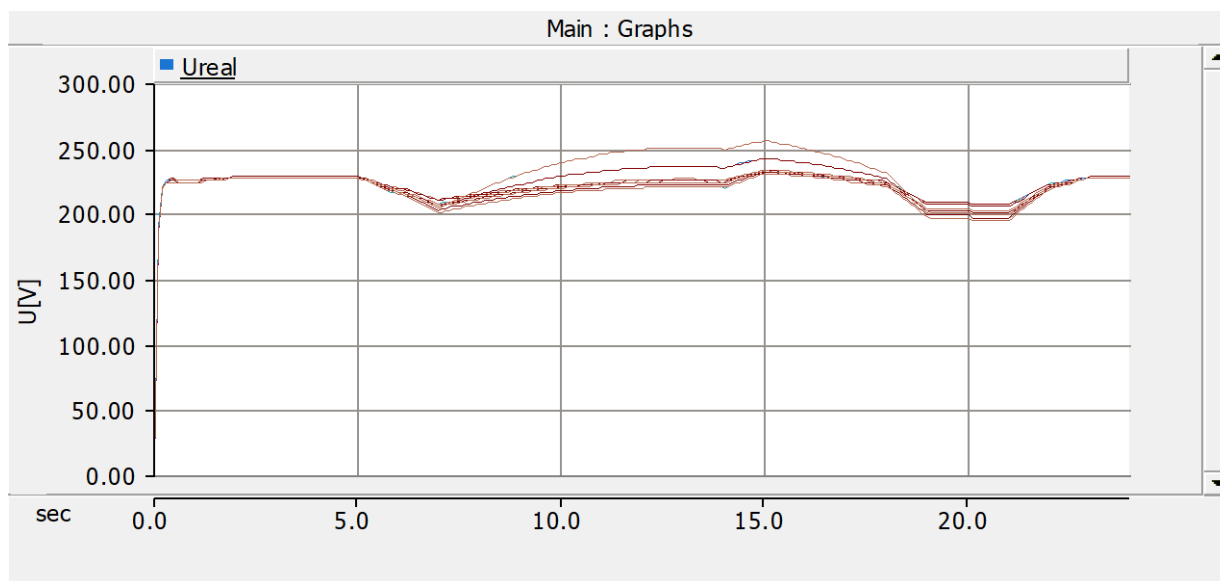
### 9.1 Topologie sítě

Nastavená síť bude mít napaječ VN, který přes venkovní vedení VN napájí primární stranu DTS 250 kVA. Z DTS vychází jeden vývod kabelového vedení. Z DTS je jedno odběrné místo napojené přímo na tento kabel a za ním je síť rozvětvena do třech linek. V první lince jsou zapojena 2 odběrná místa OPM 2 a OPM3. Linky 2 a 3 jsou připojeny kabelem dlouhým 100m. V lince 2 jsou vzdálená odběrná místa 3 a na konci kabelového vedení je fotovoltaická elektrárna 3x50kW. Linka 3 je propojena pomocí venkovního vedení a jsou zde 4 odběrná místa. Schéma této sítě doplněná o hodnoty výkonů OPM a FVE, délky a typu vedení vidíme na obrázku 46.



Obrázek 46 - Schéma testovací sítě

V této modelové situaci nastává problém, kdy při generaci FVE dochází k vysokému nárůstu napětí na odběrných místech linky 2. Naopak v lince 3 má tendenci klesat napětí v dopoledních a večerních hodinách, kdy ke generaci z FVE nedochází a naopak se zvyšuje spotřeba na OPM. Průběh napětí běžného dne můžeme vidět na obrázku 47.

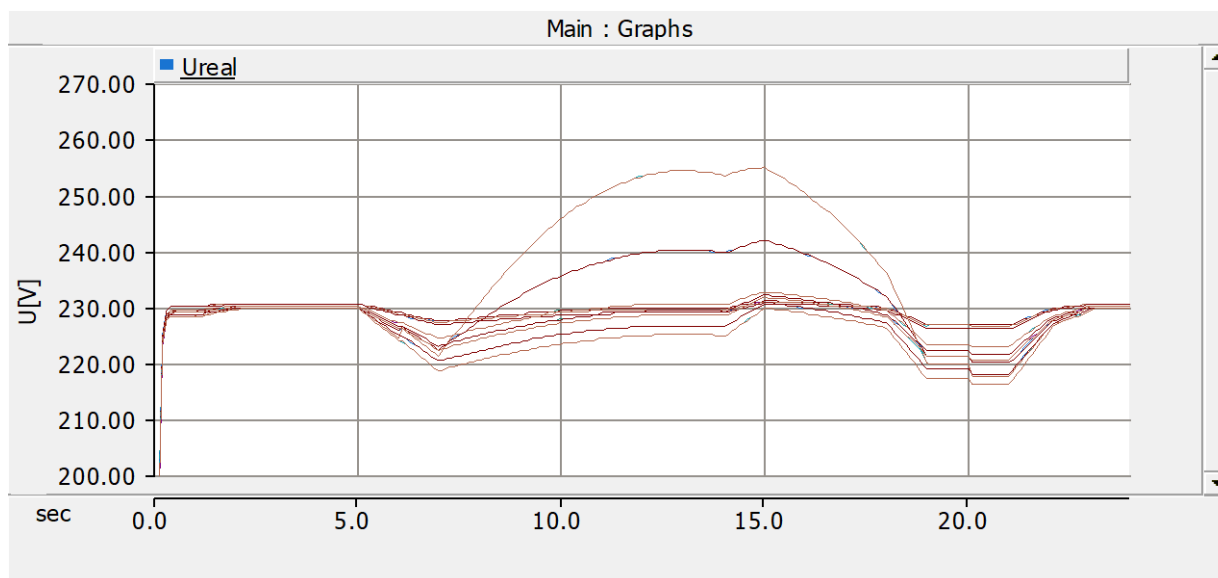


Obrázek 47- Průběh napětí při jmenovitém převodu transformátoru

Nutno upozornit, že toto je pouze modelová situace, která má maximálně otestovat možnosti regulace pomocí OLTC. V reálném případě, za aplikace dnešních norem provozování sítě NN by tento stav neměl nastat. Také jsme se dopustily chyby při zadávání parametrů transformátoru. Místo katalogových hodnot ze zdroje [33] jsme ponechali předchozí nastavení programu PSCAD. Z tohoto důvodu nám vyšly vyšší poklesy napětí než ve skutečnosti, z důvodu zadaných vysokých ztrát na transformátoru. Průběh hodnot napětí se správnými hodnotami můžeme vidět na obrázku 49. Bohužel jsme tuto chybu zjistili až po proběhnutí simulací. Z principiálního hlediska na regulaci tato chyba nemá vliv. Naopak otestuje lépe regulační schopnosti jednotlivých regulačních strategií. Chybné nastavení transformátoru můžeme vidět na obrázku 48.

General	
Transformer Name	T1
3 Phase Transformer MVA	0.25 [MVA]
Base operation frequency	50.0 [Hz]
Winding #1 Type	Delta
Winding #2 Type	Y
Delta Lags or Leads Y	Lags
Positive sequence leakage reactance	0.1 [pu]
Ideal Transformer Model	Yes
Eddy current losses	0.1 [pu]
Copper losses	0.1 [pu]
Tap changer on winding	#1

Obrázek 48- Chybné nastavení parametrů DTS



Obrázek 49 - Profily napětí při správném nastavení transformátoru

## 9.2 Scénáře simulací

Zde si ukážeme několik scénářů regulace této sítě. Pro zajištění správné analýzy výsledků se vyvarujeme dynamických změn, které mají základ na náhodnosti. Pro analýzu dat získaných měřeními si vyexportujeme potřebné průběhy, jak přímo graficky z prostředí PSCAD, tak i číselně do souboru s oddělovači .csv. Na tyto data aplikujeme algoritmus vytvořený v prostředí Matlab a vytvoříme tabulku hodnot, které budeme analyzovat. Budeme generovat soubor hodnot průběhů buď z agregovaných hodnot zadaných v měření a agregovaných hodnot 10min intervalů nebo pouze z agregovaných měřených intervalů, pokud bude přímo na elektroměru zadán agregační interval 10 min. Výsledná tabulka se bude sestávat ze 2 částí. První segment se vyhodnocuje pro celou síť. Druhý pak pro každé odběrné místo.

Pro každý scénář a každý řádek tabulky vypočítáme percentil 5, 50, 95, střední hodnotu a pomocí metody 3sigma vypočítáme  $1\sigma$  a  $2\sigma$ . Tyto hodnoty nám dávají souhrnný pohled na to, jak se nám pohybují hodnoty denního diagramu sítě. Pro hodnoty  $Unormal10$  a  $Unormal15$  je vždy nutno brát v potaz hodnotu agregovanou 10 min z důvodu normy dodržení velikosti napětí v normě EN 50160.  $Unormal10$  nám dává informaci kolik procent změřených hodnot splňovalo kritérium této normy 95% týdenních změřených efektivních hodnot musí být v rozmezí  $\pm 10\%$ .  $Unormal15$  nám dává informaci o tom zda 100% hodnot bylo udrženo v rozmezí  $+10\%$  až  $-15\%$ . Pro zjednodušení budeme předpokládat, že výsledný průběh napětí je jakýmsi ekvivalentem agregovaných 10minutových hodnot za týden.

### 9.2.1 Pevné nastavení odbočky

Pro analýzu výchozího stavu uvažujeme polohu odbočky 0 tedy jmenový převod transformátoru. Po simulaci PSCAD pro kompresní čas 1728s, exportu daných hodnot a výpočtu v prostředí Matlab nám vyšly hodnoty uvedené v tabulce 17. Pro simulaci stavu budeme uvažovat nasazení používaného transformátoru s přepínáním bez zatížení 22/0,4  $\pm 2 \times 2,5\%$ .

Tabulka 17- Souhrnné výsledky pro pevné nastavení převodu 1

Scenář1	percentil 5	percentil 50	percentil 95	avg	1 $\sigma$	2 $\sigma$
	[V]	[V]	[V]	[V]	[V]	[V]
Síť	201,3886	224,2472	235,1987	221,4232	231,6138	241,8043

Uzel	percentil 5	percentil 50	percentil 95	avg	1 $\sigma$	2 $\sigma$	Unorma10	Unorma15
[-]	[V]	[V]	[V]	[V]	[V]	[V]	[%]	[%]
OPM1	207,6076	224,8603	230,0503	222,0121	228,8797	235,7473	95,8039	100,0000
OPM2	207,2763	224,6939	229,8727	221,8292	228,7709	235,7125	95,8039	100,0000
OPM3	206,7583	224,3507	229,5906	221,5432	228,6025	235,6618	90,9085	100,0000
OPM4	203,6973	224,9031	231,2648	221,1605	229,5084	237,8563	89,5098	100,0000
OPM5	201,2797	226,0347	239,6021	223,6886	235,1210	246,5534	88,1111	100,0000
OPM6	199,7604	225,8087	251,9812	227,9777	244,3999	260,8222	83,2156	95,8039
OPM7	202,2075	224,1993	230,6184	220,3480	229,0276	237,7072	88,1111	100,0000
OPM8	201,3177	223,6438	230,2327	219,8625	228,7479	237,6332	87,4117	100,0000
OPM9	198,7911	221,7929	228,9417	218,4817	227,9848	237,4878	83,9150	100,0000
OPM10	196,6862	220,1832	227,8396	217,3286	227,3747	237,4208	81,8169	95,8039

Hned na první pohled je jasné, že počáteční stav absolutně nevyhovuje normám pro velikosti napětí. Pokud bysme se snažili o nastavení co nejlepšího stavu v síti změnou odbočky transformátoru bez zatížení tak bychom museli jít s odbočkou transformátoru napětově dolů tedy nastavíme převod transformátoru na 1,025. Vyhodnocení hodnot pro tento provozní stav můžeme vidět v tabulce 17.

Tabulka 18- Souhrnné výsledky pro pevné nastavení převodu 1,025

Scenář 2	percentil 5	percentil 50	percentil 95	avg	1 $\sigma$	2 $\sigma$
	[V]	[V]	[V]	[V]	[V]	[V]
Síť	195,3437	218,5320	229,7097	215,7137	226,0607	236,4078

Uzel	percentil 5	percentil 50	percentil 95	avg	1 $\sigma$	2 $\sigma$	Unorma10	Unorma15
[-]	[V]	[V]	[V]	[V]	[V]	[V]	[%]	[%]
OPM1	201,7640	219,2067	224,3780	216,3348	223,2735	230,2123	86,0042	100,0000
OPM2	201,4231	218,9901	224,1930	216,1469	223,1625	230,1781	85,3044	100,0000
OPM3	200,8900	218,6072	223,9039	215,8532	222,9909	230,1285	83,9048	100,0000
OPM4	197,7314	219,2729	225,6322	215,4504	223,9079	232,3654	81,1057	100,0000
OPM5	195,2384	220,4577	234,1055	218,0224	229,6209	241,2193	80,4059	90,9027
OPM6	193,6712	220,2259	246,7350	222,3953	239,0829	255,7705	81,8055	90,9027
OPM7	196,1939	218,5272	224,9694	214,6148	223,4175	232,2203	79,0063	95,8013
OPM8	195,2755	217,9311	224,5738	214,1155	223,1323	232,1492	78,3065	90,9027
OPM9	192,6668	216,0386	223,2168	212,6949	222,3545	232,0140	74,8076	90,2029
OPM10	190,4935	214,2965	222,0864	211,5088	221,7328	231,9567	72,0084	88,8034

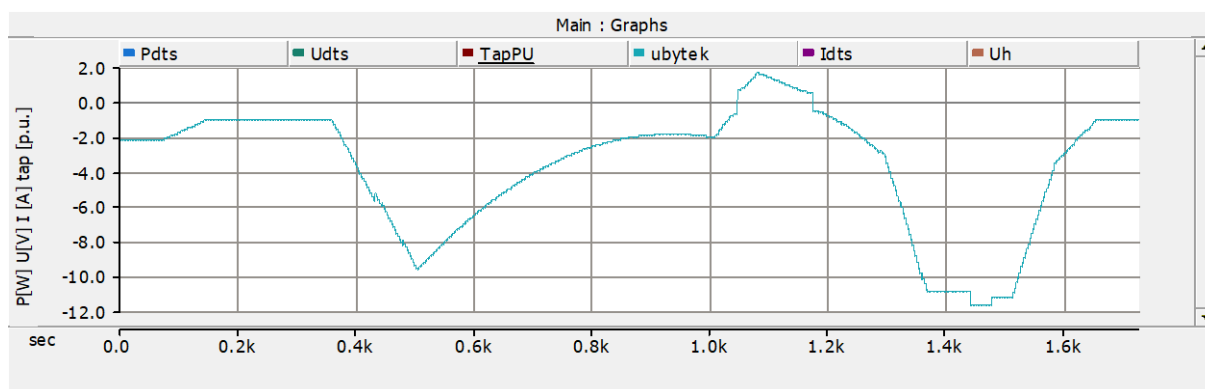
Z tabulky je jasné, že denní profily napětí v síti se dostanou hluboko pod dolní mez, a tudíž se stanou nevyhovujícími. Pro zabezpečení správných mezí velikostí napětí se tedy musíme nasadit dodatečnou regulaci. V dalších simulacích bude nasazen OLTC transformátor.

## 9.2.2 Přepínání odboček na základě měření na sekundární straně DTS

Pro tuto regulaci jsme simulovali celkem 2 scénáře. Použili jsme modul tapch\_PU. Tyto 2 scénáře se od sebe liší svým nastavením. Nastavení této regulace probíhá intuitivně.

Pro první scénář budeme postupovat následovně. Protože víme, že celkový výkon všech OPM je v součtu fází okolo 150 kW. Zvolíme si  $P_{\max}$  například ve třetině této hodnoty na 100 kW. V tomto případě nastane pokles napětí, velikost poklesu si nastavíme na  $U_{\max} = 215$  V. Pro stav, kdy probíhá přetok do sítě VN jsme nastavili maximální přetok 5000 kW a napětí 260V. Pro stav kdy se výroba rovná spotřebě jsme nastavili 240 V. Pro nastavení střední impedance jsme odhadli vzdálenost 200 metrů kabelu NAYY 150mm<sup>2</sup>.

Hodnoty úbytku napětí můžeme vidět z grafu na obrázku 50.



Obrázek 50 - Průběh úbytku napětí na fiktivní zátěži

Krok odbočky transformátoru byl nastaven 3%. Další nastavení je vidět na obrázku 51.

Pásmo pomalé regulace	0.06
pasmo rychlé regulace	0.09
Cas T1- pomala reg	1800
Cas T2- rychla reg	3
Agregacni interval prvku	1
pocet odbocek	9
Pmax	5000
Pmin	-100000
Umax	250
Umin	215
U0	230
Uf	230

Obrázek 51-Nastavení modulu tapch\_PU pro scénář 3

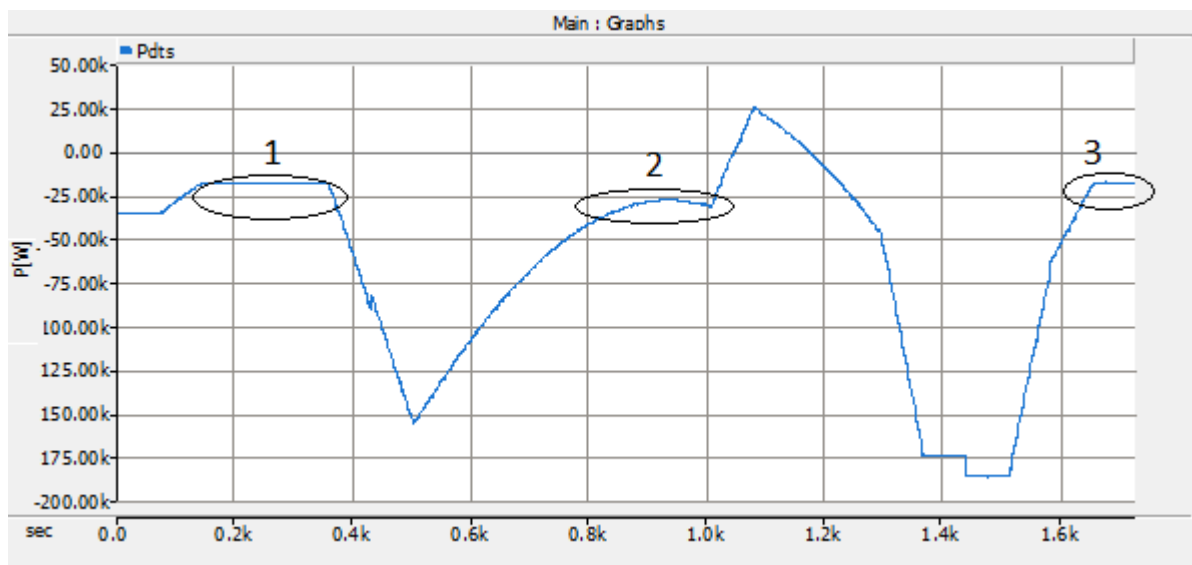
Simulací jsme dostali tyto hodnoty, viz tabulka 19.

Tabulka 19 - Souhrnné výsledky pro scénář 3

Scénář 3	percentil 5	percentil 50	percentil 95	avg	1 $\sigma$	2 $\sigma$
	[V]	[V]	[V]	[V]	[V]	[V]
Síť	215,6644	226,5991	248,9537	229,5963	239,9647	250,3331

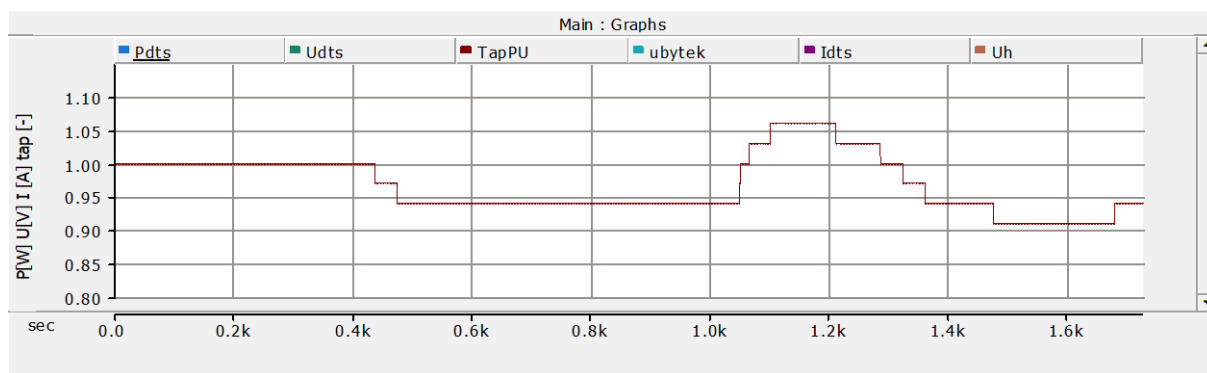
Uzel	percentil 5	percentil 50	percentil 95	avg	1 $\sigma$	2 $\sigma$	Unorma10	Unorma15
[ - ]	[V]	[V]	[V]	[V]	[V]	[V]	[%]	[%]
OPM1	217,5738	227,1527	245,5919	230,0995	238,6767	247,2539	100,0000	100,0000
OPM2	217,4157	227,1226	245,4995	229,9254	238,4985	247,0716	100,0000	100,0000
OPM3	217,1686	226,9276	245,3550	229,6533	238,2223	246,7914	100,0000	100,0000
OPM4	217,2821	226,3171	244,4565	229,3233	238,2974	247,2715	100,0000	100,0000
OPM5	216,9504	226,3844	250,0081	231,8191	243,0098	254,2005	100,0000	100,0000
OPM6	215,5414	230,8484	263,6032	236,0198	251,6555	267,2913	80,4059	80,4059
OPM7	216,5423	226,1875	244,0539	228,5529	237,5469	246,5409	100,0000	100,0000
OPM8	216,1311	226,1101	243,8137	228,0927	237,1092	246,1256	100,0000	100,0000
OPM9	214,5742	225,8917	243,1346	226,7845	235,9085	245,0326	100,0000	100,0000
OPM10	212,7021	225,7096	242,5688	225,6922	234,9536	244,2151	100,0000	100,0000

Z naměřených hodnot vidíme, že napětí je mimo rozsah normy v místě OPM 6, které je nejbližší FVE. Je to z důvodu více radiálních větví. Při plném výkonu FVE ve 13:00 její výroba je na maximu ale nepokrývá celou spotřebu sítě vyznačené místo 2, viz obrázek 52. Z tohoto důvodu změříme za DTS výkon pro dodávku, která nám nastavuje nižší napětí při nerozpoznané výrobě FVE. Bilanci výkonů na DTS si ukážeme na grafu, který se nachází na obrázku 52. Zároveň nemůžeme nastavit o moc vyšší hodnotu napětí při  $U_0$ , z důvodu podobných nízkých hodnot odběru na vyznačených místech v grafu v místech 1,2,3.



Obrázek 52 - Bilance toku výkonů na transformátoru

Jak můžeme vidět na obrázku 53, přepínač odboček zareaguje až na stav přetoků do vyšší hladiny napětí. Celkově bylo provedeno 15 přepnutí.



Obrázek 53 - Průběh přepínání odboček při scénáři 3

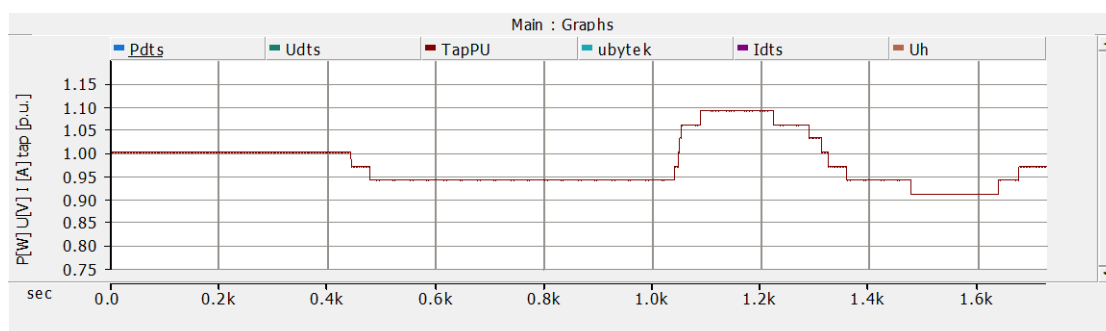
V dalším scénáři jsme zkusili upravit nastavení. Zde jsme se pokusili zlepšit situaci přenastavením  $U_0$  na 240 V. Situace ohledně reakce na vyšší napětí je v tomto případě o něco lepší. Vidět to můžeme z hodnoty napětí OPM 6, kdy hodnota  $1\sigma$  251,6555 V na klesla na 250,0893 V. Zároveň s hodnotou  $U_0$  nemůžeme pokračovat o moc výše z důvodu percentilu 5 u místa s největším úbytkem OPM 10 kde se tato hodnota zmenšila z původních 212,7021 V na nyníšších 208,856 V.

Po proběhnutí simulace scénáře 4 jsme z naměřených hodnot dostali výsledky, které vidíme v tabulce 19.

Tabulka 20 - Souhrnné hodnoty stavu po simulaci scénáře 4

Scénář 4	percentil 5	percentil 50	percentil 95	avg	$1\sigma$	$2\sigma$
	[V]	[V]	[V]	[V]	[V]	[V]
Síť	211,0424	226,3171	246,2681	228,0565	238,9830	238,9830

Uzel	percentil 5	percentil 50	percentil 95	avg	$1\sigma$	$2\sigma$	$Unorma10$	$Unorma15$
[-]	[V]	[V]	[V]	[V]	[V]	[V]	[%]	[%]
OPM1	211,2299	227,0315	241,9013	228,5550	238,0898	247,6246	100,0000	100,0000
OPM2	211,0670	226,8555	241,8669	228,3799	237,9056	247,4313	100,0000	100,0000
OPM3	210,8125	226,7126	241,8130	228,1063	237,6198	247,1334	100,0000	100,0000
OPM4	212,1697	226,3171	242,0147	227,7790	237,4834	247,1877	100,0000	100,0000
OPM5	216,3760	226,0347	250,0081	230,3017	241,7553	253,2088	100,0000	100,0000
OPM6	215,5414	226,8766	263,6032	234,5431	250,0893	265,6356	81,1057	81,1057
OPM7	211,4637	226,1875	241,4002	227,0044	236,7012	246,3979	100,0000	100,0000
OPM8	211,0424	226,1101	241,2418	226,5416	236,2437	245,9457	100,0000	100,0000
OPM9	209,8497	225,8917	240,2435	225,2263	234,9835	244,7407	100,0000	100,0000
OPM10	208,8560	225,4586	239,3790	224,1281	233,9763	243,8244	97,9006	100,0000



Obrázek 54- Průběh přepínání odboček při scénáři 4



### 9.2.3 Přepínání odboček na základě měření na OPM

V prvním scénáři budeme uvažovat měření napětí v agregovaných hodnotách 10 min. Odběry a výkony FVE zůstanou stejné. Pro regulaci jsme použily náš modul Tapch\_online s následující parametrizací uvedenou na obrázku 55.

Tap step	0.03
Referenční hodnota	230
Pásmo necitlivosti	0.06
pasmo rychlé regulace	0.09
Cas T1- pomala reg	1800
Cas T2- rychla reg	3
Agregacni interval prvku	10
pocetodbocek	9

Obrázek 55- Tabulka nastavení Tapch\_online

Zanalyzované hodnoty ze simulačního programu PSCAD můžeme vidět v tabulce XX.

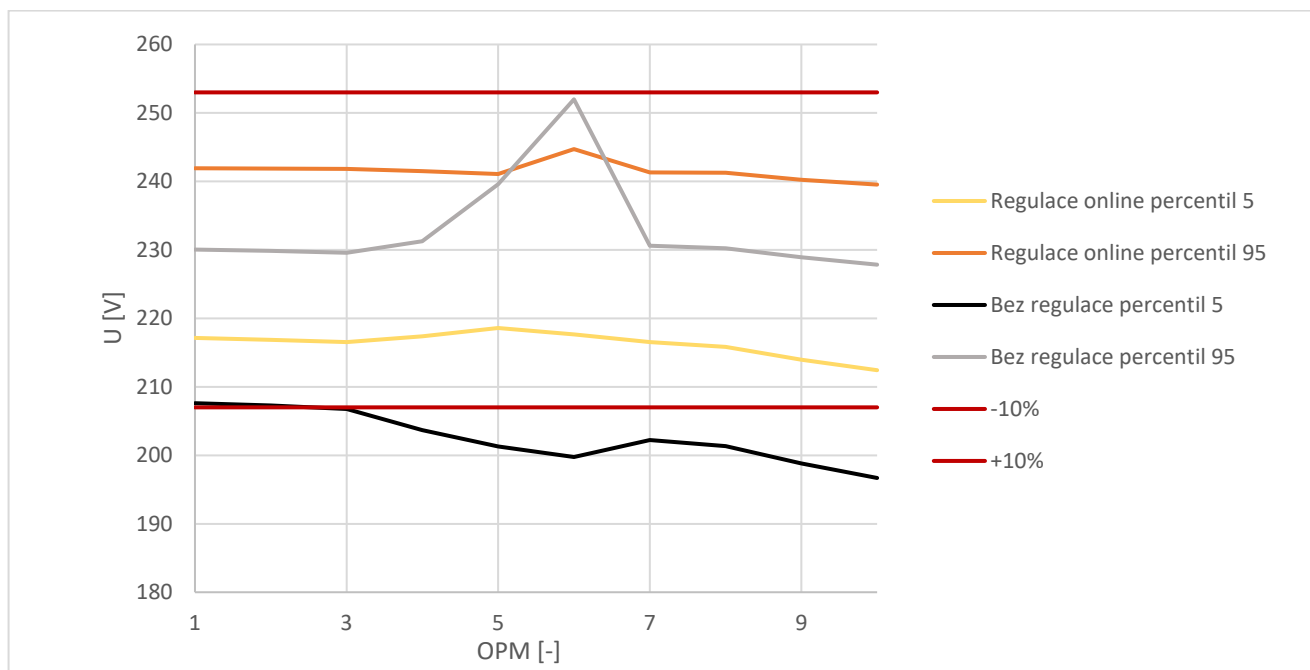
Tabulka 21-- Průběh přepínání odboček při scénáři 5

Scénář 5	percentil 5	percentil 50	percentil 95	avg	1 $\sigma$	2 $\sigma$
	[V]	[V]	[V]	[V]	[V]	[V]
Síť	215,0056	225,2385	241,8923	225,5299	233,3536	241,1774

Uzel	percentil 5	percentil 50	percentil 95	avg	1 $\sigma$	2 $\sigma$	Unorma10	Unorma15
[-]	[V]	[V]	[V]	[V]	[V]	[V]	[%]	[%]
OPM1	217,1554	225,9860	241,9013	226,0108	233,1479	240,2850	100,0000	100,0000
OPM2	216,8701	225,8207	241,8669	225,8324	232,9992	240,1659	100,0000	100,0000
OPM3	216,5253	225,5399	241,8130	225,5536	232,7694	239,9851	100,0000	100,0000
OPM4	217,3771	224,9494	241,4802	225,2361	231,8897	238,5433	100,0000	100,0000
OPM5	218,5892	226,5019	241,0638	227,8545	233,9417	240,0289	100,0000	100,0000
OPM6	217,6398	231,6927	244,7142	232,2391	241,7571	251,2751	100,0000	100,0000
OPM7	216,5423	224,3023	241,3308	224,4467	231,2720	238,0973	100,0000	100,0000
OPM8	215,8089	223,4677	241,2418	223,9752	230,9152	237,8553	100,0000	100,0000
OPM9	213,9538	222,0455	240,2435	222,6347	229,9448	237,2549	100,0000	100,0000
OPM10	212,4265	220,8203	239,5345	221,5155	229,1806	236,8457	100,0000	100,0000

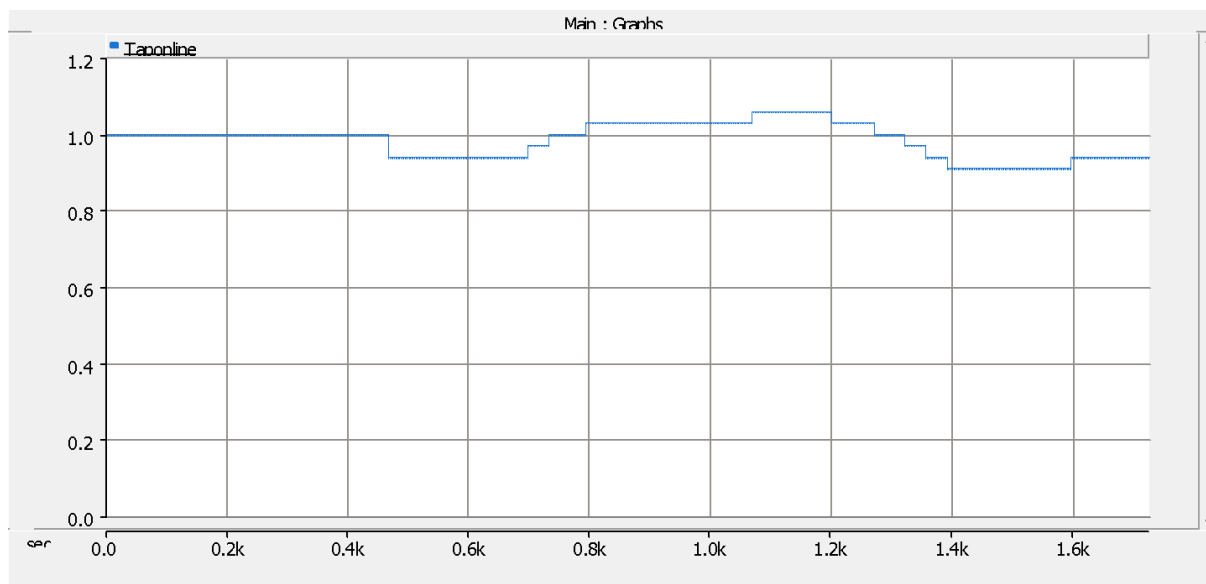
Z výše uvedených hodnot lze vidět že došlo k významnému zlepšení co se týče velikosti napětí. Hodnoty *Unorma10* a *Unorma15* se nám zlepšily na úroveň 100%. Percentilové hodnoty taktéž vykazují velké zlepšení. Pro porovnání jsme si graficky zpracovali hodnoty percentil 5 a percentil 95, před a po regulaci. Grafickou závislost vidíme v grafu na obrázku 56.





Obrázek 56 - Grafické porovnání percentipových hodnot napětí OPM před a po regulaci

Z průběhů hodnot vidíme, že se nám po regulaci všechny hodnoty dostaly od percentil 5-95 do mezí daných normou. Pro regulaci během tohoto časového úseku přepínač odboček vybavil celkem 12 krát. Průběh přepnutí odboček v čase vidíme v grafu na obrázku č. 58.



Obrázek 57- Historie změny odbočky pro online regulaci na základě měření 10 min intervalů

Pro další porovnání jsme si vybrali scénář, kdy se agregační doba měření zmenšila 10x na interval 1 min. Došlo k minimální odchylce v řádů desetin. Z pohledu normy EN 50160 se situace nezměnila a zůstává dodržena, jak můžeme vidět v tabulce 21.

Tabulka 22 - Souhrnné hodnoty po analýze scénáře 6

Scénář 6	percentil 5	percentil 50	percentil 95	avg	1 $\sigma$	2 $\sigma$
	[V]	[V]	[V]	[V]	[V]	[V]
Síť	215,3251	225,3873	241,7303	225,4986	233,1862	240,8738

Uzel	percentil 5	percentil 50	percentil 95	avg	1 $\sigma$	2 $\sigma$	Unorma10	Unorma15
[-]	[V]	[V]	[V]	[V]	[V]	[V]	[%]	[%]
OPM1	217,0321	226,0911	241,9260	225,9759	233,0009	240,0260	100,0000	100,0000
OPM2	216,8045	225,8850	241,8921	225,7976	232,8562	239,9147	100,0000	100,0000
OPM3	216,4333	225,5663	241,7513	225,5189	232,6325	239,7462	100,0000	100,0000
OPM4	217,4380	224,9404	241,1597	225,2036	231,7205	238,2374	100,0000	100,0000
OPM5	218,2765	226,8188	240,5851	227,8274	233,6005	239,3737	100,0000	100,0000
OPM6	217,5158	232,8382	243,8440	232,2189	241,3981	250,5773	100,0000	100,0000
OPM7	216,4227	224,2800	240,8418	224,4143	231,1226	237,8309	100,0000	100,0000
OPM8	215,8150	223,4439	240,7374	223,9428	230,7775	237,6121	100,0000	100,0000
OPM9	214,0300	221,9445	240,2114	222,6025	229,8391	237,0756	100,0000	100,0000
OPM10	212,3633	220,7576	239,8291	221,4835	229,0999	236,7163	100,0000	100,0000

## 10 ZÁVĚR

Tato diplomová práce pojednává o koordinaci profilů napětí v distribuční síti se zaměřením na síť nízkého napětí. Řeší současný problém s trendem obnovitelných zdrojů elektrické energie, který má vliv na distribuční síť z hlediska zvýšení fluktuací velikosti napětí nad dovolené meze dané normou EN 50160. Zabývá se koncepcí aktivní vícestupňové regulace, kterou uvažuje také NAP SG, nasazené ve dvou úrovních. Prvním stupněm je DTS vybavená přepínačem odboček pod zatížením a v případě potřeby může být nasazen prvek druhý, kterým bude sériový transformátor napětí, zastoupený buď linkovým kondiciérem nebo sériovým napěťovým regulátorem.

V úvodu je rozebrán stávající stav regulace napětí v DS s ohledem na síť NN a problematika napěťových profilů. Největší problém je u sítě, kdy na DTS je napojeno více radiálních vývodů. Je zde názorně popsán stav, kdy napětí uregulovat pouze transformátorem s přepínáním odboček.

V další části je jistá sumarizace prostředků, které přímo ovlivňují napěťové poměry v sítích NN. Jsou zde uvedeny vlastnosti OLTC přepínačů odboček, sériových transformátorů konstantního výkonu nebo linkové kondicionéry a sériové napěťové regulátory, které se nasazují přímo v nevyhovující lince. Přepínačem odboček můžeme regulovat napětí v DTS více než  $\pm 10\%$  a linkovými prvky pak v řádech jednotek až 10-20%. Závisí na typu. Limitní stav pro regulaci linkovým kondiciérem je vyrovnání až 30% poklesu napětí.

V další části jsme se zabývali měřeními a přenosem dat k regulátoru. Z pohledu distributora se jako ekonomické řešení jeví jako ideální přenos technologií PLC. Jako riziko je možnost rušení na některých místech sítě a neschopností data přenášet. Taková místa by bylo ideální vyselektovat a nasadit jinou přenosovou cestu. Nabízí se využití datového přenosu mobilních sítí, které mají již vynikající pokrytí a také vysokou přenosovou rychlost a odezvu daleko lepší než PLC. U moderních bezdrátových sítí se RTT uvádí 20-60 ms a u PLC se uvádí 140 ms avšak přenosová rychlost je podstatně nižší a také je zde velké riziko rušení.

Následuje popis modelu, který byl vytvořen v programu PSCAD. Model má simulační čas 1728 s, což odpovídá kompresi denní doby 1:50. Toto je nejmenší simulační čas, který můžeme použít z důvodu modelování měření elektroměry a agregace měřených hodnot. Modelovali jsme síť NN, která se větvila na 3 radiální vedení a do jednoho z nich injektuje svůj výkon FVE. V těchto vedeních je umístěno 10 odběrných míst, která mají specifický časově proměnný odběr. Ten nám charakterizuje denní diagram zatížení. V závislosti na něm se nám mění velikost napětí. Namodelovali jsme také dva druhy regulátorů odboček, první typ má rozhodovací algoritmus na základě měření výkonu a napětí na sekundární straně DTS. Druhý pak analyzuje agregované hodnoty změřeného napětí přímo z OPM.

Nastavili jsme si síť tak, aby při stavu na odbočce, která simuluje jmenovitý převod, byly překonány extrémy  $\pm 10\%$ . Následně jsme nastavili dané časy simulací a prvky do požadovaného nastavení a postupně simulovali různé scénáře. Vyhodnotili jsme je graficky přímo v PSCAD a pomocí prostředí výpočetního programu Matlab. Ze scénářů 1 a 2 nám vyplývá, že soustavu nelze dostat do mezí standartním transformátorem s přepínáním odboček bez zatížení 2x2,5%.

Dále jsme simulovali síť se zapojeným přepínačem odboček na základě P/U regulace. Pro naši síť je obtížné nastavit řídicí křivky tak, aby se uregulovalo napětí v celé síti, z důvodu více radiálních vedení. Dále jsme nastavili impedanční kompenzaci úbytku napětí v síti. Zvolili jsme

střední hodnotu impedance v místě 200 m od DTS připojeným kabelem NAYY 150mm<sup>2</sup>. Ve scénáři 3 a 4 se v nastavení regulátoru mění hodnota  $U_0$ , která nám udává mimo jiné sklony řídicích charakteristik. Regulátor špatně reaguje z důvodu, že velikosti výkonu, který dodává transformátor jsou ve 3 stavech podobné. Při stavu bez FVE jsou však úbytky napětí vyšší než při stavu s FVE, která dodává do sítě. Nelze zde zadat více hodnot napětí pro jednu hodnotu měřeného výkonu. I přes tuto skutečnost dokázala regulace zlepšit napětí v 9 z 10 OPM. Při stavu 4 vidíme, že se nám podařilo snížit maximální napětí, kdy nám hodnota  $1\sigma$  klesla z hodnoty 251,6555 V na 250,0893 V ve scénáři 4. Zároveň vidíme, že hodnotu  $U_0$  nemůžeme nastavit o moc vyšší z důvodu zvýšení úbytků napětí. Hodnota percentilu 5, u místa s největším úbytkem OPM 10, se zmenšila z původních 212,7021 V na nynějších 208,856 V. Po zvýšení sklonu charakteristiky nám také vzrostl počet přepnutí z 12 přepnutí za den na 15. Tato regulace má vyšší potenciál v méně rozvětvených sítích z důvodu dostupné pouze jedné měřené hodnoty.

Ve scénáři 5 a 6 máme uvedenou regulaci na základě měření maximálních a minimálních hodnot napětí za daný agregační interval. V případě scénáře 5 jsme jako hodnoty pro měření nastavily 10 min agregační interval. Po simulaci a následném vygenerování dat, jsme zjistili, že v síti nám došlo k výraznému zlepšení, co se týče rozptylu hodnot. Všechna odběrná místa se dostala do normy EN 50160. V posledním scénáři 6, jsme zkrátily agregační interval na 1 minutu. Došlo ke zlepšení či zhoršení hodnot v řádech desetin V. Tedy tato změna rychlosti dostupnosti dat v tomto scénáři nevedla ke zlepšení.

Z výsledků simulací je patrné, že nasazení transformátorů OLTC má zcela jistě své opodstatnění z hlediska regulace napětí. V případě více radiálních sítí s větší délkou a velkým kolísáním napětí je vhodné nasadit lokální řešení sériovým prvkem pro nápravu napětí. Jde o ekonomicky výhodné a hlavně rychlé řešení vzhledem k délce trvání administrativních a stavebních prací spojených s budováním nových kabelových vedení. Nejefektivnější byla regulace na základě měření hodnot napětí na odběrných místech. To ovšem za předpokladu, že data budou k dispozici, nebudou podléhat rušení a budou měřit s malou velikostí chyby.

Jelikož bývá v síti NN daleko více odběrných míst připojených k jedné DTS, než máme v tomto modelu, bylo by vhodné, data z míst, která jsou si impedančně blízká agregovat po skupinách například v datovém koncentrátoru. Přenos z měřících míst do koncentrátoru by byl na kratší vzdálenost, tudíž by byla vyšší spolehlivost dat posílaných po PLC. Zároveň by zde mohly být odfiltrovány chybné hodnoty a odeslán jakýsi statistický průměr do nadřazené DTS po bezpečné a spolehlivé komunikační cestě. Kvalita měřených dat je tedy základní predispozicí ke kvalitní regulaci sítě NN.

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Národní akční plán pro chytré sítě. *Ministerstvo průmyslu a obchodu* [online]. 2015, únor 2015 [cit. 2018-01-03]. Dostupné z:  
<https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/elektroenergetika/2016/11/Narodni-akcni-plan-pro-chytre-site.pdf>
- [2] VÁPENÍK, René. Regulace napětí v distribuční soustavě vn a nn. *Elektrorevue*. 2011, 2011(3), 5. ISSN 1213-1539.
- [3] *Průmyslová elektroenergetika: Napěťové poměry v distribuční soustavě* [online]. Západočeská univerzita v Plzni, 2000 [cit. 2018-01-09]. Dostupné z:  
<http://home.zcu.cz/~tesarova/PE/Soubory/Kap4.pdf>
- [4] HORÁLEK, Josef a Vladimír SOBĚSLAV. Technologie a požadavky na inteligentní síť pro Smart Grid. *Elektrorevue* [online]. 2012, Prosinec 2012, 2012(6), 6 [cit. 2018-01-05]. ISSN 1213-1539.
- [5] T. Kang, S. Essakiappan, P. Enjeti and S. Choi, "Towards a smart distribution transformer for smart grid," *2015 9th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE-ECCE Asia)*, Seoul, 2015, pp. 1997-2003.
- [6] *V Drahanec na to jdou přes chytrou síť* [online]. [cit. 2018-01-09]. Dostupné z:  
[http://w5.siemens.com/web/cz/cz/corporate/portal/home/produkty\\_a\\_sluzby/sektor\\_energy/pages/chytra-reseni.aspx](http://w5.siemens.com/web/cz/cz/corporate/portal/home/produkty_a_sluzby/sektor_energy/pages/chytra-reseni.aspx)
- [7] *AGT Constant Voltage Transformers* [online]. [cit. 2018-01-09]. Dostupné z:  
[http://www.aelgroup.co.uk/pdf/ds\\_agt.pdf](http://www.aelgroup.co.uk/pdf/ds_agt.pdf)
- [8] What is a Constant Voltage Transformer (CVT) - an introduction to the perfect sine wave [online]. [cit. 2018-01-09]. Dostupné z: [http://www.aelgroup.co.uk/pdf/ds\\_agt.pdf](http://www.aelgroup.co.uk/pdf/ds_agt.pdf)
- [9] *ON-GRID SOLÁRNÍ ELEKTRÁRNY* [online]. 2015 [cit. 2018-04-21]. Dostupné z: [1]  
<http://www.baratech.cz/stresni-solarni-elektrarny>
- [10] *Prezentace MRES: 06* [online]. Brno: VUT UEEN [cit. 2018-08-21].
- [11] *CHARAKTERISTIKY NAPĚTÍ ELEKTRICKÉ ENERGIE VE VEŘEJNÉ DISTRIBUČNÍ SÍTI: 4. Vydání* [online]. [cit. 2018-06-15]. Dostupné z:  
<https://www.csres.cz/Upload/PNE%2033%203430-7kn.pdf>
- [12] UHLÍK, Stanislav. *Regulace napětí v distribuční soustavě*. Plzeň, 2011. DIPLOMOVÁ PRÁCE. ZČU. Vedoucí práce Doc. Ing. Miloslava Tesařová, Ph.D.
- [13] *Mapa pokrytí signálem: Vodafone* [online]. 2018 [cit. 2018-07-23]. Dostupné z:  
<https://www.vodafone.cz/proc-vodafone/#perfektni-sit>
- [14] SEKOT, Karel. *Regulace napětí v distribuční soustavě*. Brno, 2009. DIPLOMOVÁ PRÁCE. VUT. Vedoucí práce Doc. Ing. JIŘÍ MIŠUREC, CSc.
- [15] KAPOUN, Vladimír. *SMART GRIDS - CHYTRÉ SÍTĚ V ENERGETICE*. Brno, 2013. Bakalářská Práce. VUT. Vedoucí práce Doc. Ing. JIŘÍ MIŠUREC, CSc.
- [16] *Regulace napětí v ES* [online]. PLZEŇ, ZČU [cit. 2018-07-23]. Dostupné z:  
[http://hosting.pilsfree.net/fantom/FEL/MR/\\_pred\\_web/12\\_PrMR\\_12RegulaceU.pdf](http://hosting.pilsfree.net/fantom/FEL/MR/_pred_web/12_PrMR_12RegulaceU.pdf)
- [17] *ELEKTRICKÉ STANICE A VEDENÍ* [online]. BRNO: doc. Ing. Jaroslava Orságová, Ph.D., VUT [cit. 2018-07-25].

- [18] *Přenosová a distribuční soustava 5. část - transformační a spínací stanice, vedení nízkého napětí (NN)* [online]. [cit. 2018-07-28]. Dostupné z: <https://www.eon-distribuce.cz/onas/novinky/media/prenosova-a-distribucni-soustava-5-cast-transformacni-a-spinaci-stanice-vedeni-nizkeho-napeti-nn>
- [19] *ECOTAP VPD* [online]. [cit. 2018-07-28]. Dostupné z: [https://www.reinhausen.com/en/desktopdefault.aspx/tabid-1947/2820\\_read-7909/undefined/](https://www.reinhausen.com/en/desktopdefault.aspx/tabid-1947/2820_read-7909/undefined/)
- [20] *Transforma.smart* [online]. [cit. 2018-07-28]. Dostupné z: [https://www.ormazabal.com/sites/default/files/noticias/documentacion/ca-459-en-1510\\_fy\\_euw.pdf](https://www.ormazabal.com/sites/default/files/noticias/documentacion/ca-459-en-1510_fy_euw.pdf)
- [21] *Hodnocení provozu transformátorů VN/NN s regulací napětí pod zátěží: Jan Struska* [online]. 2015 [cit. 2018-07-30]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/37137679-Zapadoceska-univerzita-v-plzni-fakulta-elektrotechnicka-katedra-elektroenergetiky-a-ekologie-diplomova-prace.html>
- [22] *Line voltage regulator for low voltage grids* [online]. 2015 [cit. 2018-07-30]. Dostupné z: <https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1LAB000588&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>
- [23] *LINKOVÝ KONDICIONÉR* [online]. 2011 [cit. 2018-07-30]. Dostupné z: <https://www.elcom.cz/cz/produkty/silnopruda-elektrotechnika/vykonove-specialni-menice/vylepseni-kvality-elektřiny/linkovy-kondicioner>
- [24] *Smart Grid Technologies: Communication Technologies and Standards* [online]. 2011 [cit. 2018-08-10]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/profile/Salih\\_Ergut/publication/224257498\\_Smart\\_Grid\\_Technologies\\_Communication\\_Technologies\\_and\\_Standards/links/56ccb4e508ae85c8233bc062/Smart-Grid-Technologies-Communication-Technologies-and-Standards.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Salih_Ergut/publication/224257498_Smart_Grid_Technologies_Communication_Technologies_and_Standards/links/56ccb4e508ae85c8233bc062/Smart-Grid-Technologies-Communication-Technologies-and-Standards.pdf)
- [25] *NB PLC and Software Defined Networking for Smart Grid Applications* [online]. S. Rinaldi, F. Bonafini, P. Ferrari, A. Flammini, 2017 [cit. 2018-08-10]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8078348>
- [26] *Modelování silnoprůdých vedení I – metody* [online]. [cit. 2018-08-10]. Dostupné z: <http://access.fel.cvut.cz/view.php?navezclanku=modelovani-silnoprudych-vedeni-i-%E2%80%93-metody&cislocclanku=2010070001>
- [27] *LTE TCP Throughput Vs Round Trip Time (RTT)* [online]. [cit. 2018-08-10]. Dostupné z: <http://www.teletopix.org/4g-lte/lte-tcp-throughput-vs-round-trip-time-rtt/>
- [28] DRÁPELA, Jiří a Tomáš KOLACIA. *Voltage Sensitivity to Power Flows Related to Distributed Generation*. Brno, 2016. Vědecká práce. VUT.
- [29] *Silové kabely a vodiče* [online]. 2014 [cit. 2018-08-10]. Dostupné z: [https://www.nkt.cz/fileadmin/user\\_upload/Silove\\_kabely\\_a\\_vodice\\_CZ-EN\\_2014.pdf](https://www.nkt.cz/fileadmin/user_upload/Silove_kabely_a_vodice_CZ-EN_2014.pdf)
- [30] BOLGÁR, R. *Posouzení možností regulace napětí v distribučních sítích NN*. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Ústav elektroenergetiky, 2013, 71 stran.
- [31] *ECOTAP VPD FOR DISPERSED GENERATION UNITS* [online]. 2014 [cit. 2018-08-15]. Dostupné z: [https://www.reinhausen.com/en/desktopdefault.aspx/tabid-1950/2835\\_read-7934/](https://www.reinhausen.com/en/desktopdefault.aspx/tabid-1950/2835_read-7934/)
- [32] *Technické parametry transformátorů* [online]. [cit. 2018-08-15]. Dostupné z: <http://www.power-energo.cz/p110-technicke-parametry-olejovych-transformatoru-abb.html>

# PŘÍLOHA A – SKRIPT PRO TAPCH\_PU

```
#INCLUDE 'emtstor.h'
#include 'sl.h'
!!! definování promenných
#LOCAL REAL uh1, uh2, ul1, ul2, t1s, toff, maxodb, tr, tp, ul, uh, tap, tapmax, tapmin, x, t, ron,
ponh, ponl, rton, pton, pton2, du, ustep, pp, upp, y, uph, nap, q, w, e,
!!! Výpočet hodnoty 1 s simulacního casu
t1s = $times / 86400
!!! Výpočet do které regulace nevybaví
toff = $ag * 1.5 * 60 * t1s
!!! Výpočet maximální a minimální pozice odbočky
x = $pstep - 1
maxodb = x / 2
tapmax = 1 + maxodb * $Step
tapmin = 1 - maxodb * $Step
!!! prepocet casu pomalé a rychlé regulace na simulacni cas
tr=t1s*$T2
tp=t1s*$T1
!!! krok napetí prepínace odbocek
ustep = $Step * $Ur
!!!! uložení nové hodnoty pro každý simulacní cas
ul = STORF(NSTORF)
uh = STORF(NSTORF + 1)
tap = STORF(NSTORF + 2)
t = STORF(NSTORF + 3)
ron = STORF(NSTORF + 4)
ponh = STORF(NSTORF + 5)
ponl = STORF(NSTORF + 6)
rton = STORF(NSTORF + 7)
pton = STORF(NSTORF + 8)
pton2 = STORF(NSTORF + 9)
du = STORF(NSTORF + 10)
pp = STORF(NSTORF + 11)
upp = STORF(NSTORF + 12)
y = STORF(NSTORF + 13)
uph = STORF(NSTORF + 14)
nap=STORF(NSTORF + 15)
q=STORF(NSTORF + 16)
w=STORF(NSTORF + 17)
e=STORF(NSTORF + 18)
uh1=STORF(NSTORF + 19)
uh2=STORF(NSTORF + 20)
ul1=STORF(NSTORF + 21)
ul2=STORF(NSTORF + 22)
!!! v prvním kroku se nastaví tyto hodnoty Ron- logika pro rychlou regulaci, ponh a ponl- logika
pro pomalou regulaci nahoru nebo dolu, PP a - pomocné promenné,
IF (time==delt) THEN
    ron=0
    ponh=0
    ponl=0
    tap=1
    pp=0.1
    y=0
ENDIF
!!!Nastavení Uref, tedy nap
IF ($A > $pmax) THEN
    nap=$umax
ENDIF
IF ($A < $pmin) THEN
    nap=$umin
ENDIF
IF ($A == 0) THEN
    nap = $u0
ENDIF
IF ($A >=0 .and. $A<=$pmax) THEN
    q=$umax-$u0
    nap= $u0 + $A * q/$pmax
ENDIF
IF ($A <=0 .and. $A>=$pmin) THEN
    w = $u0-$umin
    e=0-$pmin
    nap= $u0 + $A * w / e
```

```

ENDIF

!!!!uz i s odch
nap= nap + $PLH

nap=nap + (1 - tap) *$Ur

!!! definování hranic regulace Nec- hranice pro pomalou regulaci, Urych - hranice pro rychlou
regulaci napetí
uh1 = $Ur + $Nec * $Ur
uh2 = $Ur + $Urych * $Ur

ul1 = $Ur - $Nec * $Ur
ul2 = $Ur - $Urych * $Ur

!!! nastavení Uref do promenné uh v case vyšším než toff
IF (time >= toff ) THEN
    uh=nap
ENDIF

!!!! rychla regulace dolu

IF (time >= toff .and. uh2 <= uh .and. tap < tapmax .and. ron==0) THEN
    rton= time + tr
    ron = 1
ENDIF

IF (time >= rton .and. ron==1) THEN

    tap = tap + $Step
    ron = 0
    ponh=0
    ponl=0
ENDIF

!!!! rychla regulace nahoru
IF (time >= toff .and. ul2 >= uh .and. tap > tapmin .and. ron==0) THEN
    ron=2
    rton= time + tr
ENDIF

IF (time >= rton .and. ron == 2) THEN
    tap = tap - $Step
    ron=0
    ponh=0
    ponl=0
ENDIF

!!!! pomala regulace dolu
IF (time >= toff .and. uh1 <= uh .and. uh < uh2 .and. tap < tapmax .and. ponh==0) THEN
    ponh = 1
    pton= time + tp + 0.02
    pton2= time + tp/2 +0.01
ENDIF

IF (time >= pton2 .and. uh1 <= uh .and. uh < uh2 .and. tap < tapmax .and. ponh==1) THEN
    ponh=2
ENDIF

IF (time >= pton .and. ponh==2) THEN
    tap = tap + $Step
    ponh=0
    ponl=0
ENDIF

!!!! pomala regulace nahoru
IF (time >= toff .and. ul1 >= uh .and. uh >= ul2 .and. tap > tapmin .and. ponl==0) THEN
    ponl=1
    pton= time + tp + 0.02
    pton2= time + tp / 2 +0.01
ENDIF

IF (time >= pton2 .and. ul1 >= uh .and. uh >= ul2 .and. tap > tapmin .and. ponl==1) THEN
    ponl=2

```



```
ENDIF
```

```
IF (time >= pton .and. ponl==2 ) THEN
```

```
    tap = tap - $Step  
    ponl=0
```

```
ENDIF
```

```
!!! Nactení výstupu zvoleného převodu
```

```
$TAP=tap
```

```
!!! Uložení proměnných pro další cyklus
```

```
STORF(NSTORF) = ul
```

```
STORF(NSTORF + 1) = uh
```

```
STORF(NSTORF + 2) = tap
```

```
STORF(NSTORF + 3) = t
```

```
STORF(NSTORF + 4) =ron
```

```
STORF(NSTORF + 5) =ponh
```

```
STORF(NSTORF + 6) =ponl
```

```
STORF(NSTORF + 7) =rton
```

```
STORF(NSTORF + 8) =pton
```

```
STORF(NSTORF + 9) =pton2
```

```
STORF(NSTORF + 10) =du
```

```
STORF(NSTORF + 11) =pp
```

```
STORF(NSTORF + 12) =upp
```

```
STORF(NSTORF + 13) =y
```

```
STORF(NSTORF + 14) =uph
```

```
STORF(NSTORF + 15) =nap
```

```
STORF(NSTORF + 16) =q
```

```
STORF(NSTORF + 17) =w
```

```
STORF(NSTORF + 18) =e
```

```
STORF(NSTORF + 19) =uh1
```

```
STORF(NSTORF + 20) =uh2
```

```
STORF(NSTORF + 21) =ul1
```

```
STORF(NSTORF + 22) =ul2
```

```
    NSTORF = NSTORF + 23
```

## PŘÍLOHA B - SKRIPT PRO TAPCH\_ONLINE

```
#INCLUDE 'emtstor.h'
#include 'sl.h'
!!! definování proměnných
#LOCAL REAL uh1, uh2, ul1, ul2, t1s, toff, maxodb, tr, tp, ul, uh, tap, tapmax, tapmin, x, t, ron,
ponh, ponl, rton, pton, pton2, du, ustep, pp, upp, y, alarm, uph, z
!!! Výpočet hodnoty 1 s simulacního času
t1s = $times / 86400
!!! Výpočet do které regulace nevybaví
toff = $ag * 1.5 * 60 * t1s
!!! Výpočet maximální a minimální pozice odbočky
x = $pstep - 1
maxodb = x / 2
tapmax = 1 + maxodb * $Step
tapmin = 1 - maxodb * $Step
!!! Výpočet hranic pro pomalou a rychlou regulaci
uh1 = $Ur + $Nec * $Ur
uh2 = $Ur + $Urych * $Ur

ul1 = $Ur - $Nec * $Ur
ul2 = $Ur - $Urych * $Ur
!!! prepocet casu pomalé a rychlé regulace na simulacní cas
tr=t1s*$T2
tp=t1s*$T1
!!! krok napetí prepínace odbocek
ustep = $Step * $Ur
!!!! uložení nové hodnoty pro každý simulacní cas

ul = STORF(NSTORF)
uh = STORF(NSTORF + 1)
tap = STORF(NSTORF + 2)
t = STORF(NSTORF + 3)
ron = STORF(NSTORF + 4)
ponh = STORF(NSTORF + 5)
ponl = STORF(NSTORF + 6)
rton = STORF(NSTORF + 7)
pton = STORF(NSTORF + 8)
pton2 = STORF(NSTORF + 9)
du = STORF(NSTORF + 10)
pp = STORF(NSTORF + 11)
upp = STORF(NSTORF + 12)
y = STORF(NSTORF + 13)
alarm = STORF(NSTORF + 14)
uph = STORF(NSTORF + 15)
z = STORF(NSTORF + 16)
!!! v prvním kroku se nastaví tyto hodnoty Ron- logika pro rychlou regulaci, ponh a ponl- logika
pro pomalou regulaci nahoru nebo dolů, PP a - pomocné promenné, alarm

IF (time==delt) THEN
    ron=0
    ponh=0
    ponl=0

    tap=1
    pp=0.1
    y=0
    alarm=0
ENDIF
!!! načtení po času kdy je vypnutá regulace prvních hodnot z elektroměrů
IF (time >= toff ) THEN
    uh = $PLH
    ul = $PLL
ENDIF

!!!! rychla regulace dolu
IF (time >= pp) THEN
    y = 0
    ron=0

ENDIF

IF (time >= toff .and. uh2 <= uh .and. tap < tapmax .and. ron==0) THEN
    rton= time + tr
    ron = 1

ENDIF
```

```

IF (time >= rton .and. ron==1 ) THEN

    tap = tap + $Step
    ron = 0

    ponh=0
    ponl=0

ENDIF
!!!! rychla regulace nahoru
IF (time >= toff .and. ul2 >= ul .and. uh2 >= uh .and. tap > tapmin .and. ron==0) THEN
    ron=2
    rton= time + tr
    !!!! ověření zda není nová hodnota vyšší než uh2- blokování zacyklení
    upp = ul + y * ustep
    pp= time + $ag * 60* t1s
    t=y+1
    uph = uh + t * ustep

ENDIF

IF (time >= rton .and. ron == 2 .and. ul2 > upp .and. uh2 > uph) THEN
    tap = tap - $Step
    ron=0
    y=y+1
    ponh=0
    ponl=0

ENDIF
!!!! pomala regulace dolu
IF (time >= toff .and. uh1 <= uh .and. uh < uh2 .and. ul2 < ul .and. tap < tapmax .and. ponh==0)
THEN
    ponh = 1
    pton= time + tp + 0.02
    pton2= time + tp/2 +0.01

ENDIF

IF (time >= pton2 .and. uh1 <= uh .and. uh < uh2 .and. tap < tapmax .and. ponh==1) THEN
    ponh=2

ENDIF

IF (time >= pton .and. ponh==2) THEN
    tap = tap + $Step
    ponh=0
    ponl=0

ENDIF

!!! pomala regulace nahoru
IF (time >= toff .and. ul1 >= ul .and. ul > ul2 .and. uh1 >= uh .and. tap > tapmin .and. ponl==0)
THEN
    ponl=1
    pton= time + tp + 0.02
    pton2= time + tp / 2 +0.01
    !!!! ověření zda není nová hodnota vyšší než horní limit necitlivosti - blokování
zacyklení
    z=1
    uph = uh+ z * ustep
    IF (uph > uh1) THEN
        ponl=0
    ENDIF

ENDIF

IF (time >= pton2 .and. ul1 >= ul .and. ul > ul2 .and. tap > tapmin .and. ponl==1) THEN
    ponl=2

ENDIF

IF (time >= pton .and. ponl==2 ) THEN

    tap = tap - $Step
    ponl=0

ENDIF
!!!! spuštění alarmového stavu
IF (time >= toff .and. ul2 > ul .and. uh > uh2) THEN
    alarm=1

ENDIF

```

```
!!!! pošleme data na výstup
$TAP=tap

$OUT1 = alarm
!!!! ukládání dat pro další krok
STORE(NSTORE) = ul
STORE(NSTORE + 1) = uh
STORE(NSTORE + 2) = tap
STORE(NSTORE + 3) = t
STORE(NSTORE + 4) = ron
STORE(NSTORE + 5) = ponh
STORE(NSTORE + 6) = ponl
STORE(NSTORE + 7) = rton
STORE(NSTORE + 8) = pton
STORE(NSTORE + 9) = pton2
STORE(NSTORE + 10) = du
STORE(NSTORE + 11) = pp
STORE(NSTORE + 12) = upp
STORE(NSTORE + 13) = y
STORE(NSTORE + 14) = alarm
STORE(NSTORE + 15) = uph
STORE(NSTORE + 16) = z
NSTORE = NSTORE + 17
```